Analisa Stabilitas Bendung Gerak Pada Proyek Pembangunan Bendung Sei Padang D.I. Bajayu Tebing Tinggi Sumatera Utara

The Analysis of Stability of Gated Weir on The Construction Project of Weir at The Sei Padang D.I. Bajayu, Nort Sumatera

Binsar Maruli Sihaloho¹⁾, Edy hermanto¹⁾, Nurmaidah¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik

Universitas Medan Area, Indonesia

e-mail : sihalohobinsar@yahoo.com

Diterima: April 2019; Disetujui: Mei 2019; Dipublish: Mei 2019

Abstrak

Bendung gerak Sei Padang D.I. Bajayu di bangun pada daerah aliran sungai (DAS) Padang Tebing Tinggi. Bendung ini di desain untuk mengakomodasi kepentingan irigasi (D.I Paya Lombang 1588 Ha, D.I Langau 2000 Ha dan D.I Bajayu 4000 Ha) dan pengendalian Banjir kota Tebing Tinggi. Bendung sei Padang D.I. bajayu harus dirancang dengan struktur yang tahan lama. Sehingga pada perencanaan harus benar-benar dihitung dengan baik agar tidak terjadi kesalahan dalam pembangunan yang mengakibatkan musibah yang lebih parah akibat perhitungan perencanaan stuktur yang kurang maksimal dan kesalahan-kesalahan pada waktu pelaksanaan pembangunan. Stabilitas bendung juga sangat perlu diperhatikan karena bendung berfungsi untuk menaikkan tinggi muka air. Sasaran yang hendak dicapai adalah penentuan besarnya gaya berat sendiri, tekanan lumpur, tekanan hidrostatik, uplift, tekanan tanah aktif dan gaya gempa yang dipergunakan sebagai acuan untuk memeriksa keamanan bendung terhadap gaya guling dan gaya gelincir. Berdasarkan hasil perhitungan analisis untuk mencapai stabilitas diatas maka faktor keamanan pada saat normal gaya guling adalah 1,734 dan faktor keamanan gaya gelincir adalah 2,395. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut maka dapat ditarik kesimpulan bahwa bendung aman terhadap gaya guling dan gaya gelincir dengan mengaju pada persyaratan untuk gaya guling $Sfg > 1,5$ dan syarat untuk gaya gelincir $Sfge > 1,5$.

Kata Kunci : Bendung, Stabilitas, Guling, Gelincir

Abstract

The Gated Weir at The Sei Padang D.I. Bajayu is built in the river basin (RB) of Padang Tebing Tinggi. This weir is designed to accommodate irrigation (D.I Paya Lombang 1588 Ha, D.I Langau 2000 Ha and D.I Bajayu 4000 Ha) and The Flood Control of Tebing Tinggi city. The Gated Weir at The Sei Padang D.I. Bajayu should be designed with a durable structure. The stability of the weir is also very necessary because the weir works to raise the height of the air face. The targets to be known are gravity, sludge, hydrostatic, lift, and soil used as a reference for checking arches and slip styles. Based on the results of the analysis to achieve stability above the value at the normal time of the rolling force is 1.734 and the factor of slip hairstyle is 2.395. Based on these results, It can be concluded that the weirs are safe for bolsters and sliding force by applying to the level for the rolling force $Sfg > 1.5$ and the slip force is $Sfge > 1.5$.

Key Words : Weir, Stability, Rolling, Slip

How to Cite: Sihaloho, B.M, Edy, H, dan Nurmaidah. (2019), Analisa Stabilitas Bendung Gerak Pada Proyek Pembangunan Bendung Sei Padang D.I. Bajayu Tebing Tinggi Sumatera Utara. *JCEBT (Journal of Civil Engineering, Building and Transportation)*. 3 (1): 49-61

PENDAHULUAN

Gagalnya air masuk melalui bangunan pengambilan bebas bajayu yang berada didaerah aliran sungai (DAS) padang Tebing Tinggi, merupakan suatu masalah yang besar. Akibat musim kemarau yang berkepanjangan menyebabkan debit atau permukaan sungai padang terus menyusut. Lebih kurang 1300 hektar areal pertanian di Desa paya Lombang dan Kuta Baru, kecamatan Tebing Tinggi, kabupaten Serdang Bedagai Sumatera Utara kekeringan. Apabila keadaan ini terus berlanjut maka dapat dipastikan kondisi pertanian khususnya padi akan semakin buruk dan bahkan dapat mengalami gagal Panen. Disisi lain juga masyarakat Tebing Tinggi beranggapan bahwa bendung di Paya Lombang merupakan penyebab utama naiknya muka air sungai Padang sehingga bila debit sungai padang meningkat maka banjir di kota Tebing Tinggi tidak dapat dielakkan.

Maka dari faktor masalah tersebut Pemerintah melalui Kementrian Pekerjaan Umum , PPK Irigasi dan Rawa I, SNVT Pelaksanaan Jaringan Pemanfaatan Air Sumatera II (PJPA) Provinsi Sumatera Utara mengambil kebijakan yaitu dengan merencanakan sebuah bendung di Sei Padang dengan luas cakupan 7.558 hektar yang meliputi Daerah Irigasi Bajayu, Daerah Irigasi Paya Lombang dan Daerah Irigasi Langau. Bendung ini nantinya diharapkan dapat memenuhi kebutuhan air bagi pertanian dan mengendalikan banjir.

Dalam jurnal Tumpal Alexander Pakpahan Dan Ahmad Perwira Mulia yang berjudul, Perhitungan Stabilitas Bendung Pada Proyek PLTM Aek Silang II Dolok

Sanggul, dijelaskan bahwa Untuk merencanakan suatu bendung harus memenuhi persyaratan stabilitas yang menjadi persyaratan penting guna menjamin umur bendung dan kemampuannya untuk menaikkan muka air. Stabilitas bendung adalah bentuk gambaran yang mendefinisikan bahwa bendung tersebut dalam keadaan sempurna dapat dimanfaatkan sebagai suatu bendung, yang ditinjau dari ketahanan bendung menerima gaya-gaya internal dan eksternal yang dialaminya seperti, gaya guling, gaya geser, keruntuhan yang disebabkan oleh gempa maupun banjir.

Beberapa kejadian kerusakan bendung di Indonesia yang prinsip stabilitasnya sama dengan bendung ini adalah peristiwa jebolnya bendung sempor di Kabupaten Kebumen pada 27 november 1967, bendung lodah di Grobogan, dan bendungan Situ Gintung yang jebol pada 17 maret 2009 (Surya Online, Kementrian PU wajibkan waduk Gondang buat RTD Februari 2013). Untuk mencegah kejadian seperti ini maka perlu dilakukan analisis stabilitas bending.

Dalam hal tersebut diatas penulis tertarik untuk melakukan analisis bendung DI Bajayu guna meningkatkan pemahaman tentang bendung dan memberi manfaat bagi penelitian selanjutnya dengan topik yang sama. Adapun judul yang diambil adalah “Analisa Stabilitas Bendung Gerak Pada Proyek Pembangunan Bendung gerak Sei Padang D.I. Bajayu Tebing Tinggi Sumatera Utara”.

Adapun maksud Penelitian ini adalah untuk mennganalisa keamanan stabilitas desain bendung DI Bajayu terhadap gaya Guling, Gaya geser/gelincir

dan stabilitas daya dukung tanahnya. Tujuannya adalah untuk menjaga bangunan bendung tetap aman apabila suatu saat nanti terjadi hal-hal yang membuat bendung tersebut berguling atau bergeser seperti bencana alam. Penelitian ini akan membahas tentang nilai keamanan bendung D.I. Bajayu terhadap gaya Geser, Gaya Guling, Erosi Bawah Tanah Pada Kondisi Normal, Kondisi banjir dan Menghitung nilai keamanan Daya Dukung Tanah Bendung D.I. Bajayu.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dengan melakukan pengumpulan data dilapangan. Dan data yang menyangkut stabilitas bendung serta Menganalisis seluruh data. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan Buku Panduan Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Jaringan Irigasi KP-02 dan Bagian Bangunan Utama KP-06 Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air dan Buku-buku literatur lain.

Gambar 1. Kerangka Berpikir
Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menghitung stabilitas bendung harus ditinjau pada saat kondisi normal dan kondisi ekstrem seperti saat banjir. Ada beberapa gaya yang harus dihitung untuk mengetahui stabilitas bendung, antara lain:

- Gaya berat sendiri bendung
- Gaya gempa
- Gaya hidrostatik
- Gaya tekan ke atas (*Uplift Pressure*)
- Gaya tekan lumpur.

Pada saat banjir gaya-gaya bekerja ada yang mengalami perubahan seperti gaya tekan ke atas (*Uplift Pressure*) dan Hidrostatik. Sementara gaya-gaya yang tetap adalah gaya akibat beban sendiri, gaya gempa, dan Gaya Tekanan Lumpur.

Data Teknis Bendung

Adapun data teknis bendung DI Bajayu adalah sebagai berikut:

- Type Bendung : Bendung Gerak
- Elevasi mercu : +14.00
- Lebar bendung : 54 m
- Lebar efektif (B_e)
 - Tinggi mercu (p) : 4,3 m
 - n : jumlah pilar = 6 buah
 - K_p = koefisien kontraksi pilar = 0,01
 - K_a = koefisien kontraksi pangkal bendung = 0,2

Lebar bruto yaitu 54 m dengan 6 buah pilar dengan lebar 2 m.

Lebar netto = $54 - 6 \cdot 2 = 42$ m

$$\begin{aligned} \text{Maka, } Be &= 42 - 2(6.0,01 + 0,2) \times 4,3 \\ Be &= 39,79 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Momen} &= \text{Gaya} \times \text{jarak} \\ &= 1,15 \times 11,75 \\ &= 13,51 \text{ tm.} \end{aligned}$$

Analisis Stabilitas Bendung

Perhitungan stabilitas dihitung berdasarkan beberapa kondisi yaitu pada kondisi normal, kondisi normal ada gempa, kondisi banjir dan kondisi banjir dengan gempa. Kondisi ini diperhitungkan terhadap:

- 1) Guling , 2) Gelincir, 3) Penurunan

- Berat Sendiri Bendung

Perhitungan beban mati akibat berat sendiri didapat dari hasil perkalian berat tubuh bendung itu sendiri dengan berat jenis bahan yang digunakan. Sedangkan momen yang bekerja pada tubuh bendung akibat beban mati didapat dari hasil perkalian gaya akibat berat sendiri dengan lengan momen yang ditinjau dari titik keruntuhan.

Gambar 2. Beban Mati Sebagai Gaya Akibat Berat Sendiri

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Perhitungan:

Besar gaya berat sendiri segmen G1 ;

ypasanganbeton = 2,3 ton/m3

$$\begin{aligned} \text{Volume} &= \text{panjang} \times \text{tinggi} \times \text{lebar} \\ &= 1,0 \times 0,5 \times 1 \\ &= 0,5 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Besar gaya} &= \text{Volume} \times \text{Bj Pas. Beton} \\ &= 0,5 \times 2,3 \end{aligned}$$

Tabel1. Gaya dan Momen Akibat Berat Sendiri

No Gaya	Luas m ²	Berat Jenis t/m ³	Gaya ton	Panjang Lengan m	Momen tm	Catatan
G1	0.50 x 1.00	= 0.5	2.3	1.15	13.51	V
G2	0.50 x 4.00	= 2	2.3	4.6	42.55	V
G3	0.50 x 1.00	= 0.5	2.3	1.15	7.76	V
G4	3.50 x 6.00	= 21	2.3	48.3	446.78	V
G5	3.50 x 6.00 x 0.5	= 10.5	2.3	24.15	100.71	V
G6	0.50 x 5.00	= 2.5	2.3	5.75	56.06	V
G7	1.00 x 1.50	= 1.5	2.3	3.45	39.68	V
G8	1.00 x 1.00 x 0.5	= 0.5	2.3	1.15	11.98	V
G9	1.00 x 1.00 x 0.5	= 0.5	2.3	1.15	8.72	V
G10	1.50 x 3.50	= 5.25	2.3	12.075	66.41	V
G11	1.00 x 1.50 x 0.5	= 0.75	2.3	1.725	7.33	V
G12	2.50 x 3.75	= 9.375	2.3	21.5625	40.43	V
Total			126.213		841.9164	

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

- Gaya Akibat Gempa

Gaya akibat beban gempa berupa gaya horizontal (H_e) dan momen gempa (M_e) Besarnya dihitung dengan rumus:

$$H_e = E * G$$

Dimana E (Koefisien gempa)

Berdasarkan peta zona gempa dan peta geologi, Kabupaten Serdang Bedagai dan Kota Tebing Tinggi terletak pada zona C. Maka diambil nilai $Z = 1,0$ dan jenis tanah adalah Diluvium dengan nilai $n = 0,87$ dan $m = 1,05$. Serta diperhitungkan dengan periode ulang kegempaan yaitu periode ulang 100 tahun dengan nilai $a_c = 160 \text{ cm/det}^2$

$$A_d = n (a_c \times Z)^m = 0,87(160.1)^{1,05} = 179,409 \text{ cm/det}^2.$$

Maka, Koefisien Gempa E adalah

$$E = \frac{a_d}{g} = \frac{179,409 \text{ cm/det}^2}{981 \text{ cm/det}^2} = 0,183$$

Gambar 3. Gaya akibat gempa
Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

perhitungan:

$\gamma_{pasanganbeton} = 2,3 \text{ ton/m}^3$

Besar gaya akibat Gempa segmen K1

Besar gaya berat (G1) = 1,15 ton

Besar gaya = koefisien x gaya berat sendiri

$$= 0,183 \times 1,15$$

$$= 0,2105 \text{ ton}$$

Momen = Gaya x Jarak

$$= 0,2105 \times 6,25$$

$$= 1,32 \text{ tm}$$

Selanjutnya perhitungan dilakukan dengan cara tabelaris.

Tabel 2. Gaya dan Momen Akibat Gempa

No Gaya	Koefisien Gempa (E)	Gaya Berat (G)	Gaya Gempa $K = E \times G$	Panjang Lengan (m)	Momen Guling (tm)	Catatan
K1	0.183	1.15	0.21	6.25	1.32	H
K2	0.183	4.60	0.84	6.25	5.26	H
K3	0.183	1.15	0.21	6.25	1.32	H
K4	0.183	48.30	8.84	4.13	36.46	H
K5	0.183	24.15	4.42	3.83	16.93	H
K6	0.183	5.75	1.05	2.25	2.37	H
K7	0.183	3.45	0.63	1.5	0.95	H
K8	0.183	1.15	0.21	1.67	0.35	H
K9	0.183	1.15	0.21	1.67	0.35	H
K10	0.183	12.08	2.21	1.75	3.87	H
K11	0.183	1.73	0.32	0.67	0.21	H
K12	0.183	21.56	3.945938	1.25	4.93	H
Total			23.097		74.307	

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

- Tekanan Air / Hidrostatik

Perhitungan dilakukan dengan mengambil potongan 1 meter panjang bendung dan tekanan air yang diperhitungkan adalah gaya hidrostatik. Besar gaya hidrostatik adalah fungsi

kedalaman yang bekerja tegaklurus terhadap muka bangunan.

Tekanan air arah horizontal (hidrostatik).

$$P_n = \frac{1}{2} \times h \times \gamma \text{ air}$$

$$h = 4 \text{ meter}; \gamma \text{ air} = 1 \text{ ton/m}^2$$

$$P_n = \frac{1}{2} \times 4 \times 1,0 = 2 \text{ t/m}^2$$

Gaya hidrostatik P :

$$P = P_n \times h = 2 \times 6.5 = 13 \text{ ton}$$

Tinggi titik tangkap gaya hidrostatik (lengan momen) :

$$h_{cp} = \frac{1}{3} \times 6.5 = 2.167 \text{ meter}$$

momen yang bekerja

$$M = P \times h_{cp} = 13 \times 2.167 = 28.17 \text{ tm}$$

Gambar 4. Gaya Hidrostatik Pada Keadaan Normal

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Selanjutnya Perhitungan gaya Hidrostatik dapat dilihat pada table dibawah ini.

Tabel 4. Gaya dan Momen Akibat Tekanan Hidrostatik Pada Keadaan Normal

No Gaya	Luas (m ²)	Berat Jenis (ton/m ³)	Gaya H (ton)	Gaya V (ton)	Lengan H (m)	Momen H (tm)	Momen V (tm)
W1	4.0 x 6.5 x 0.5 = 13.00	1.00	13		2.167	28.17	
W2	2.5 x 6.5 = 16.25	1.00	16.25		3.25	52.81	
W3	2.5 x 2.5 x 0.5 = 3.125	1.00	3.125		11.42		35.688
W4	4.6 x 4.6 x 0.5 = 10.58	1.00	-10.58		1.533	-16.22	
Total			18.67	3.125		64.76	35.688

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

- Tekanan Lumpur

Gaya ini berasal dari tanah lumpur menekan bangunan air.

$$H_L = \frac{1}{2} \cdot K_L \cdot \gamma_w \cdot H_T^2$$

Dimana :

H_L = gaya horizontal lumpur.

K_L = koefisien tekanan lumpur, biasanya = 0,5.

γ_w = berat jenis lumpur dalam air.

H_T = tinggi lumpur.

Dianggap lumpur setinggi mercu dengan berat isi lumpur = 1,2 ton/m³ dan sudut geser dalam = 30 derajat

$$P_s = 0,167 h^2 \text{ (ton/m}^3\text{)}$$

Gambar 5. Tekanan Lumpur yang Bekerja
Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Besarnya gaya tekanan lumpur

$$= 0,167 h^2 = 0,167 \times 0,5^2 = 0,0418 \text{ ton}$$

Besar Momen Tekanan Lumpur

$$= \text{Besar Gaya Lumpur} \times \text{Panjang Lengan}$$

$$= 0,0418 \times 6.167 = 0.258 \text{ t.m (dapat dilihat dalam Tabel 5).}$$

Tabel 5. Gaya dan Momen Akibat Tekanan Lumpur

No	Gaya	Panjang Lengan m	Momen t.m	Catatan
1	$0.167 \times 0.5^2 = 0.0418$	6.167	0.258	H
Total		0.0418	0.258	H

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

- Gaya Angkat/ Uplift

Gaya Up Lift yang bekerja pada bendung adalah gaya tekan air yang bekerja pada dasar dan tubuh bendung. Gaya ini bekerja tegak lurus terhadap bidang tegak . Besar Gaya Up Lift pada setiap titik pada dasar bendung dapat dihitung dengan mempergunakan Teori Lane sebagai berikut :

$$P_x = H_x - \frac{L_x}{L} \Delta H$$

Total panjang rayapan $L_{tot} = 17,63$ meter, dan $\Delta h = 5,50$ meter.

Gambar 6. Gaya Uplift yang Bekerja Pada Kondisi Normal

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Perhitungan:

$$P1 = 6,5 \times 1,5 \times 1,00 = 9,75 \text{ ton ; Jarak (Panjang Lengan) = } 10,75 + 1,5/2 = 11,5 \text{ m}$$

Maka Momen dibidang 1 akibat gaya Uplift = $9,75 \times 11,5 = 112,13 \text{ t.m.}$

Tabel 6. Gaya dan Momen Akibat Uplift Pada Kondisi Normal

No	Gaya	Panjang Lengan m	Momen t.m	Catatan
1	$6,5 \times 1,5 \times 1,0 = 9,75$	11,50	112,125	V
2	$5,26 \times 1,00 \times 1,0 = 5,26$	10,25	53,915	V
3	$5,01 \times 1,50 \times 1,0 = 7,515$	9,00	67,635	V
4	$5,01 \times 1,00 \times 1,0 = 5,01$	7,75	38,828	V
5	$5,44 \times 2,00 \times 1,0 = 10,88$	6,25	68,000	V
6	$5,44 \times 1,50 \times 1,0 = 8,16$	4,50	36,720	V
7	$5,22 \times 3,75 \times 1,0 = 19,575$	1,88	36,801	V
8	$0,25 \times 1,50 \times 1,0 \times 0,5 = 0,1875$	11,75	2,203	V
9	$1,25 \times 1,00 \times 1,0 \times 0,5 = 0,625$	9,75	6,094	V
10	$0,25 \times 1,50 \times 1,0 \times 0,5 = 0,1875$	9,25	1,734	V
11	$0,77 \times 1,00 \times 1,0 \times 0,5 = 0,385$	7,58	2,918	V
12	$0,34 \times 2,00 \times 1,0 \times 0,5 = 0,34$	6,58	2,237	V
13	$0,7 \times 1,50 \times 1,0 \times 0,5 = 0,525$	4,25	2,231	V
14	$0,62 \times 3,75 \times 1,0 \times 0,5 = 1,1625$	2,50	2,906	V
Total		69,563	434,348	

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Stabilitas Bendung Pada Kondisi Normal

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa tubuh bendung harus stabil terhadap guling, geser dan penurunan. Untuk menghitung stabilitas tersebut maka terlebih dahulu gaya-gaya dan momen yang bekerja ditabulasi sehingga memudahkan perhitungan. Tabulasi gaya dan momen yang terjadi pada kondisi normal dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 7. Tabulasi Gaya dan Momen Kondisi Normal

No	Item	Gaya Horizontal		Gaya Vertikal		Momen		Faktor	
		(+)	(-)	(+)	(-)	Momen Tahanan	Momen Guling	Guling	Geser
1	Berat Sendiri Bendungan			126.200	841.920				
2	Gaya Gempa Tekanan	23.097					83.947		
3	Lumpur Gaya	0.042					0.258		
4	Hidrostatik	29.250	10.580	3.125	51.908	80.980			
5	Uplift Pressure			69.563		434.348			
	Dengan Gaya Gempa	52.389	10.580	69.563	129.325	893.828	599.533	1.491	1.323
	Tanpa Gaya Gempa	29.292	10.580	69.563	129.325	893.828	515.586	1.734	2.395

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Faktor Keamanan Terhadap Guling Pada Kondisi Normal

Faktor keamanan terhadap guling dapat dihitung dengan cara:

$$Sf = \frac{\sum M_t}{\sum M_g} > \text{Faktor Keamanan Izin}$$

M_g = momen total sesungguhnya yang menyebabkan terjadinya guling

M_t = momen tahan terhadap guling

SF = faktor keamanan terhadap guling.

Faktor Keamanan Terhadap Guling Tanpa Gempa

$$\frac{\sum M_t}{\sum M_g} \geq SFGulingtanpaGempa$$

$$\frac{893.828 \text{ ton.m}}{515.586 \text{ ton.m}} \geq 1,50$$

$$1,734 > 1,50 \rightarrow \text{OK}$$

Faktor Keamanan Terhadap Guling Dengan Gempa

$$\frac{\sum M_t}{\sum M_g} \geq SFGulingdenganGempa$$

$$\frac{893,828 \text{ ton.m}}{599.533 \text{ ton.m}} \geq 1,30$$

$$1,491 > 1,30 \rightarrow \text{OK}$$

Faktor Keamanan Terhadap Gelincir Pada Kondisi Normal

Faktor keamanan terhadap gelincir dapat dihitung dengan cara:

$$Sf = \frac{f \cdot \sum V + C \cdot B}{\sum H} \geq SFizin$$

dengan:

C = kohesi tanah = 0 untuk pasir (kg/m^2)

B = lebar telapak (m)

$\sum V$ = gaya verikal total (ton)

$\sum H$ = gaya horizontal total (ton)

f = Kefisien Gelincir = 0,75

Faktor Keamanan Terhadap Gelincir Tanpa Gempa

$$\frac{f \cdot \sum V}{\sum H} \geq Fge$$

$$\frac{0,75 \cdot (129,325 - 69,563)}{(29,29 - 10,58)} \geq 1,50$$

$$2,395 > 1,50 \rightarrow \text{OK}$$

Faktor Keamanan Terhadap Gelincir dengan Gempa

$$\frac{f \cdot \sum V}{\sum H} \geq Fge \frac{0,75 \cdot (129,325 - 69,563)}{(53,389 - 10,58)} \geq 1,30$$

$$1,323 > 1,30 \rightarrow \text{OK}$$

Gaya Luar yang Bekerja Pada Kondisi Banjir

- Gaya Angkat/ Uplift

Gambar 7. Gaya Hidrostatik pada Kondisi Banjir

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Perhitungan Segmen 1 :

$$P_n = \frac{1}{2} \times h \times \gamma \text{ air}$$

$$h = 4 \text{ meter}; \gamma \text{ air} = 1 \text{ ton/m}^2$$

$$P_n = \frac{1}{2} \times 4 \times 1,0 = 2 \text{ t/m}^2$$

Gaya hidrostatik P :

$$P = P_n \times h = 2 \times 5 = 10 \text{ ton}$$

Tinggi titik tangkap gaya hidrostatik (lengan momen) :

$$h_{cp} = 7 + 5 \times \frac{2}{3} = 10,33 \text{ meter}$$

momen yang bekerja:

$$M = P \times h_{cp} = 10 \times 10,33 = 103,30 \text{ tm}$$

Untuk selanjutnya besarnya gaya dan momen akibat tekanan hidrostatik dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 8. Gaya dan Momen yang Bekerja Akibat Tekanan Air pada Kondisi Banjir

No	Luas m ²	Berat Jenis ton/m ³	Gaya		Lengan m	Momen	
			H ton	V ton		H t.m	V t.m
1	5,0 x 4 X 0,5 = 10,00	1,00		10,00	10,33		103,30
2	7,0 x 1,8 X 0,5 = 6,30	1,00		6,30	2,33		14,68
3	6,5 x 6,5 X 0,5 = 21,125	1,00	21,125		2,17	45,84	
4	4,1 x 6,5 = 26,65	1,00	26,65		3,250	86,61	
5	6,0 x 4 X 0,5 = 12	1,00		12,00	4,000		48,00
6	8,3 x 6,5 X 0,5 = 26,975	1,00	-26,975		2,170	-58,54	
1'	5,0 x 1,8 X 0,5 = 4,5	1,00		4,50	8,670		39,02
2'	7,0 x 1,8 X 0,5 = 6,3	1,00		6,30	4,670		29,42
6'	1,8 x 6,5 X 0,5 = 5,85	1,00	-5,85		4,330	-23,33	
			47,775			132,45	234,42
Total			-32,825	-39,10		-83,87	

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

- Tekanan Lumpur

Tekanan lumpur yang terjadi sama antara kondisi normal dan banjir sehingga gaya yang bekerja akibat tekanan lumpur sama seperti dalam tabel 5.

- Gaya Angkat/ Uplift

Gaya angkat/ uplift sangat berpengaruh pada perbedaan tinggi energi di hulu dan di hilir bendung. Gaya angkat/ kondisi banjir dapat dilihat pada gambar berikut:

Gambar 8. Gaya Angkat yang Bekerja pada Kondisi Banjir

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Perhitungan:

$P_1 = 8,4 \times 1,5 \times 1,00 = 12,60 \text{ ton}$; Jarak (Panjang Lengan) = $10,75 + 1,5/2 = 11,5 \text{ m}$; Maka Momen dibidang 1 akibat gaya Uplift = $12,59 \times 11,5 = 144,90 \text{ t.m}$

Gaya dan momen yang bekerja di tubuh bendung pada kondisi banjir dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 9. Gaya dan Momen yang Bekerja

Akibat Gaya Angkat pada Kondisi Banjir

No	Gaya					Panjang Lengan m	Momen tm	Catatan	
1	8,4	x	1,50	x	1,0	= 12,60	11,50	144,90	V
2	8,25	x	1,00	x	1,0	= 8,25	10,25	84,56	V
3	8,1	x	1,50	x	1,0	= 12,15	9,00	109,35	V
4	8,1	x	1,00	x	1,0	= 8,10	7,75	62,78	V
5	8,26	x	2,00	x	1,0	= 16,52	6,25	103,25	V
6	8,26	x	1,50	x	1,0	= 12,39	4,50	55,76	V
7	8,05	x	3,75	x	1,0	= 30,19	1,88	56,75	V
8	0,15	x	1,50	x	1,0 X 0,5	= 0,11	11,75	1,32	V
9	0,14	x	1,00	x	1,0 X 0,5	= 0,07	9,75	0,68	V
10	0,15	x	1,50	x	1,0 X 0,5	= 0,11	9,25	1,04	V
11	0,36	x	1,00	x	1,0 X 0,5	= 0,18	7,58	1,36	V
12	0,2	x	2,00	x	1,0 X 0,5	= 0,20	6,58	1,32	V
13	0,67	x	1,50	x	1,0 X 0,5	= 0,50	4,25	2,14	V
14	0,88	x	3,75	x	1,0 X 0,5	= 1,65	2,50	4,13	V
Total						103,025	629,331		

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

- Gaya Gempa

Gaya gempa yang bekerja tidak terpengaruh pada kondisi normal maupun banjir karena gaya gempa dipengaruhi oleh factor kondisi tanah, zona kegempaan dan berat tubuh bendung itu sendiri. Sehingga nilai gaya yang bekerja akibat gempa adalah sama seperti yang telah disajikan dalam tabel 2.

Stabilitas Bendung Pada Kondisi Banjir

Tabulasi gaya dan momen yang terjadi pada kondisi banjir dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel10.Tabulasi Gaya dan Momen Kondisi Banjir

No	Item	Gaya Horizontal		Gaya Vertikal		Momen		Faktor	
		(+)	(-)	(+)	(-)	Momen Tahanan	Momen Guling	Guling	Geser
1	Berat Sendiri								
	Bendungan			126,200		841,920			
2	Gaya Gempa Tekanan	23,097					83,947		
3	Lumpur Gaya	0,042					0,258		
4	Hidrostatik Uplift	47,775	32,825		39,100	318,290	132,450		
5	Pressure			103,025			629,331		
Dengan Gaya Gempa Tanpa Gaya Gempa									
		70,914	32,825	103,025	165,300	1.160,210	845,986	1,371	1,226
		47,817	32,825	103,025	165,300	1.160,210	762,039	1,523	3,115

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Faktor Keamanan Terhadap Guling Kondisi Banjir

Faktor Keamanan Terhadap Guling Tanpa Gempa

$$\frac{\sum M_t}{\sum M_g} \geq SF_{GulingtanpaGempa}$$

$$\frac{1.160,210 \text{ ton.m}}{762,039 \text{ ton.m}} \geq 1,30$$

$$1,523 > 1,30 \rightarrow \text{OK}$$

Faktor Keamanan Terhadap Gelincir

Faktor Keamanan Terhadap Gelincir Tanpa Gempa

$$\frac{f \cdot \sum V}{\sum H} \geq F_{ge}$$

$$\frac{0,75 \cdot (165,300 - 103,025)}{(47,817 - 32,825)} \geq 1,30$$

$$3,115 > 1,30 \rightarrow \text{OK}$$

Stabilitas Terhadap Bahaya Bawah Tanah (Piping)

Metode Lane, disebut metode angka rembesan Lane (*weighted creep ratio method*), adalah yang dianjurkan untuk mengecek bangunan-bangunan utama untuk mengetahui adanya erosi bawah tanah. Metode ini memberikan hasil yang aman dan mudah dipakai. Untuk bangunan-bangunan yang relatif kecil, metode-metode lain mungkin dapat memberikan hasil-hasil yang lebih baik, tetapi penggunaannya lebih sulit.

Metode ini membandingkan panjang jalur rembesan di bawah bangunan di sepanjang bidang kontak bangunan/pondasi dengan beda tinggi muka air antara kedua sisi bangunan.

Di sepanjang jalur perkolasi ini, kemiringan yang lebih curam dari 45° dianggap vertikal dan yang kurang dari 45° dianggap horizontal. Jalur vertikal dianggap memiliki daya tahan terhadap aliran 3 kali lebih kuat daripada jalur horisontal.

$$C_L = \frac{\Sigma L_v + 1/3 \Sigma L_H}{H}$$

di mana:

- C_L : Angka rembesan Lane (lihat Tabel 4.11)
 ΣL_v : jumlah panjang vertikal, m
 ΣL_H : jumlah panjang horisontal, m
 H : beda tinggi muka air, m

Tabel 11. Harga-harga minimum angka rembesan Lane (C_L)

Pasir sangat halus atau lanau	8,5
Pasir halus	7,0
Pasir sedang	6,0
Pasir kasar	5,0
Kerikil halus	4,0
Kerikil kasar termasuk berangkal	3,0
Bongkah dengan sedikit berangkal dan kerikil	2,5
Lempung lunak	3,0
Lempung sedang	2,0
Lempung keras	1,8
Lempung sangat keras	1,6

Sumber: Standar Perencanaan Irigasi KP-02

Gambar 9. Panjang Rembesan Tanpa Sheet Pile

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Dari gambar 9. maka dapat dihitung angka rembesan Lane dimana angka rembesan Lane yang didapat harus lebih besar dibandingkan dengan angka rembesan

Lane sesuai dengan jenis tanah pondasi bendung yang tertera dalam tabel 11.

Jenis tanah pondasi yaitu pasir halus hingga sedang sehingga diambil nilai C_L sebesar 7,0.

Perhitungan panjang rayapan tanpa menggunakan sheet pile dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 12. Perhitungan Panjang Rembesan Tanpa Sheet Pile

No	Panjang Vertikal I	Horizontal II	1/3 Horizontal III	Total Panjang (I) + 1/3 (II + IV)	Panjang total (2)
1	0.00			0.00	0.00
2	1.80	1.80		1.80	1.80
3	1.00		1.00	2.80	2.13
4	0.70	0.70		3.50	2.83
5	3.00		3.00	6.50	3.83
6	1.00	1.00		7.50	4.83
7	0.80		0.80	8.30	5.10
8	1.00	1.00		9.30	6.10
9	3.00		3.00	12.30	7.10
10	1.00	1.00		13.30	8.10
11	0.80		0.80	14.10	8.37
12	1.00	1.00		15.10	9.37
13	3.00		3.00	18.10	10.37
14	2.40	2.40		20.50	12.77
15	1.50		1.50	22.00	13.27
16	1.00	1.00		23.00	14.27
17	1.50		1.50	24.50	14.77
18	1.00	1.00		25.50	15.77
19	2.00		2.00	27.50	16.43
20	1.50	1.50		29.00	17.93
21	2.00		2.00	31.00	18.60
22	1.00	1.00		32.00	19.60
23	12.00		12.00	44.00	23.60
24	0.80		0.80	44.80	23.87
25	1.00		1.00	45.80	24.20
26	3.20	3.20		49.00	27.40
Total	49.00	16.60	32.40	10.80	27.40

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Nilai panjang rembesan (L) tanpa sheet pile adalah 27,40 m.

Nilai rembesan izin = $C_L \times \Delta H$

= $7 \times 5,5$ m

= 38,5 m

Stabilitas terhadap piping :

$L < C_L \times \Delta H$

27,40 < 38,5 → **Tidak OK**

Karena nilai $L < C_L \times \Delta H$, maka tubuh bendung perlu ditambahkan sheet pile.

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Tabel 13. Perhitungan Panjang Rembesan Dengan Sheet Pile

No	Panjang I	Vertikal II	Horizontal III	1/3 Horizontal IV	Total Panjang (I)	Panjang total (2) II + IV
1	0.00				0.00	0.00
2	1.80	1.80			1.80	1.80
2'	6.00	6.00			7.80	7.80
3	1.00		1.00	0.33	8.80	8.13
4	0.70	0.70			9.50	8.83
5	3.00		3.00	1.00	12.50	9.83
6	1.00	1.00			13.50	10.83
7	0.80		0.80	0.27	14.30	11.10
8	1.00	1.00			15.30	12.10
9	3.00		3.00	1.00	18.30	13.10
10	1.00	1.00			19.30	14.10
11	0.80		0.80	0.27	20.10	14.37
12	1.00	1.00			21.10	15.37
13	3.00		3.00	1.00	24.10	16.37
14	2.40	2.40			26.50	18.77
14'	8.00	8.00			34.50	26.77
15	1.50		1.50	0.50	36.00	27.27
16	1.00	1.00			37.00	28.27
17	1.50		1.50	0.50	38.50	28.77
18	1.00	1.00			39.50	29.77
19	2.00		2.00	0.67	41.50	30.43
20	1.50	1.50			43.00	31.93
21	2.00		2.00	0.67	45.00	32.60
22	1.00	1.00			46.00	33.60
23	12.00		12.00	4.00	58.00	37.60
24	0.80		0.80	0.27	58.80	37.87
25	1.00		1.00	0.33	59.80	38.20
26	3.20	3.20			63.00	41.40
Total	63.00	30.60	32.40	10.80		

Panjang Lane **41.40**

Menggunakan Sheet Pile

$$\begin{aligned}\text{Nilai rembesan izin} &= C_L \times \Delta H \\ &= 7 \times 5,5 \text{ m} \\ &= 38,5 \text{ m}\end{aligned}$$

Stabilitas terhadap piping :

$$L \quad C_L \times \Delta H$$

41,40 > 38,5 → OK

Tabel 14. Tabel perhitungan eksentrisitas

Tinjauan	Kasus					
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
ΣM	-269,31	-312,89	-205,5	-438,87	-256,76	-490,13
ΣV	-61,45	-61,45	-54,64	-98,02	-54,64	-98,02
L	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
1/2L	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
$e = [\Sigma M / \Sigma V]$						
V-1/2L	0,87	0,16	1,49	0,77	0,55	0,25
1/6L	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
1/3L	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
$e \leq 1/6L$					0,55 < 1,75 (OK)	0,25 < 1,75 (OK)
$e \leq 1/3L$	0,87 < 3,5 (OK)	0,16 < 3,5 (OK)	1,49 < 3,5 (OK)	0,77 < 3,5 (OK)		

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Analisa Daya Dukung Pondasi

Kekuatan tekan di bawah diperoleh dari formula dan harus diuji terhadap daya dukung pondasi.

$$P = \sum V / L (1 + 6e/L)$$

Dimana,

P adalah kekuatan tekan dari lapisan bawah

Hasil perhitungan kekuatan tekan dari lapisan bawah pondasi dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 15. Perhitungan Kekuatan Tekan Dari Lapisan Bawah Pondasi

Tinjauan	Kasus					
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
ΣV	61,45	61,45	54,64	98,02	54,64	98,02
ΣH	28,8	12,82	28,9	28,9	22,17	22,17
F	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Sigma V / \Sigma H$	2,13	4,79	1,89	3,39	2,46	4,42
$(\Sigma V / \Sigma H) \times f$	1,49	3,36	1,32	2,37	1,73	3,09
SF	1,5				2,46 > 1,5 (OK)	2,42 > 1,5 (OK)
	1,3	1,49 > 1,3 (OK)	3,36 > 1,3 (OK)	1,32 > 1,3 (OK)	2,37 > 1,3 (OK)	

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Daya dukung pondasi diperoleh dari Persamaan berikut.

$$Q_u = a c N_c + r z N_q + b r B N_r$$

Dimana,

qu adalah daya dukung ultimate t/m²

C adalah kohesi, tegangan kohesi dalam t/m²

N_c, N_q, dan N_r adalah faktor daya dukung pondasi

r adalah berat jenis tanah dalam t/m².

B adalah lebar kaki pondasi menerus, m.

a dan b adalah faktor dimensi.

z adalah kedalaman pondasi di bawah permukaan tanah.

Nilai parameter untuk perhitungan daya dukung pondasi dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 15. Parameter daya Dukung Pondasi

Item	Ket.
a	1,0 KP-06
b	0,5 KP-06
C	0,0 Dari hasil Mekanika Tanah
R	1,58 Dari hasil Mekanika Tanah
Z	3,5
B	10,5
N _c	17,7 KP-06
N _q	7,4 KP-06
N _r	5,0 KP-06
qu	82,4 Dari persamaan diatas
1/3 qu	27,47 Faktor keamanan = 3,0
1/2 qu	41,2 Faktor keamanan = 2,0

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Hasil perhitungan daya dukung tanah pondasi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 16. Perhitungan Daya Dukung Pondasi

Tinjauan	Kasus					
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
$P = \Sigma V / L$						
(1+6e/L)	8,75	6,38	9,63	13,45	6,84	10,67
1/3 qu	27,47	27,47	27,47	27,47	27,47	27,47
1/2 qu	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2
1/3 qu > P					27,47 > 6,84 (OK)	27,47 > 10,67 (OK)
	41,2 > 8,75 (OK)	41,2 > 6,38 (OK)	41,2 > 9,63 (OK)	41,2 > 13,45 (OK)		
1/2 qu > P						

Sumber: Hasil Analisis 2017/2018

Dengan demikian, tubuh bendung aman terhadap daya dukung pondasinya. Namun akibat adanya beban pintu yang bergerak maka diperlukan perhitungan khusus untuk stabilitas pilar pintu yang juga merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari tubuh bendung.

SIMPULAN

Berdasarkan Analisa Stabilitas Bendung D.I. Bajayu Tebing Tinggi, Kabupaten Serdang Bedagai Provinsi Sumatera Utara, diperoleh faktor keamanan pada kondisi normal gaya guling adalah 1,734 dan faktor keamanan gaya gelincir adalah 2,395. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut maka dapat ditarik kesimpulan bahwa bendung aman

terhadap gaya guling dan gaya gelincir dengan mengaju pada persyaratan untuk gaya guling $S_{fg} > 1,5$ dan syarat untuk gaya gelincir $S_{fge} > 1,5$.

DAFTAR PUSTAKA

- Das, Braja. M., 1988 : *Mekanika Tanah*. Erlangga, Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum, Sub Direktorat Jenderal Pengairan, KP - 02. 1986, *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan*, Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum, Sub Direktorat Jenderal Pengairan, KP - 06. 2009, *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Parameter Bangunan*, Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Pakpahan, Tumpal Alexander dan Ahmad Perwira Mulia. 2013: *Perhitungan Stabilitas Bendung Pada Proyek PLTM Aek Silang II Doloksanggul*. Departemen Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara
- Robydiansah, 2012: *Kajian Ulang Stabilitas Geser Dan Guling Parafet Di Sungai Grindulu Kabupaten Pacitan*, Universitas Negeri Yogyakarta
- Siagian, Trisnafia, dkk, Oktober 2012: *Evaluasi Hidrolis Bendung Lama Terhadap Rencana Bendung Baru Pada Bendung Timbang Lawan Di Kabupaten Langkat*. Departemen Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara
- Sidharta, dkk, : *Irigasi dan Bangunan Air*, Gunadarma, Jakarta.