



Analisis Stabilitas Keamanan Bendungan Bili-Bili

***Mohammad Bagus Wiratama As'ad, Suripin, Dyah Ari Wulandari**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

^{*)}mohammadbaguswirata@students.undip.ac.id

Received: 19 Februari 2025 Revised: 8 Juli 2025 Accepted: 15 Juli 2025

Abstract

The Bili-Bili Dam located in Gowa Regency, South Sulawesi Province, is a rockfill dam with a central core, featuring a total storage capacity of 375 million m³ and sediment storage capacity of 29 million m³. Due to its high risk of structural failure, Bili-Bili Dam is classified as Class IV (Extreme). Recent developments have shown a decline in dam body stability due to seepage issues. If left unaddressed, this could trigger piping or even structural failure, posing a threat to the sustainability of the reservoir's functions. The objective of this study is to evaluate the safety factor (SF) of the main dam, right wing dam, and left wing dam as an integrated structural system of Bili-Bili Dam. The approach combines both qualitative and quantitative methods, including engineering geological assessments and Geostudio SEEP/W to analyze seepage rates and SLOPE/W to evaluate landslide potential. The analysis results indicate that seepage discharge remains within acceptable limits, and the dam's stability under Operating Basis Earthquake (OBE) conditions is considered safe. However, under Maximum Design Earthquake (MDE) conditions, the slope safety factor does not meet the minimum standard required by SNI 8064:2016. Therefore, remedial actions such as reinforcement or retrofitting of the dam body are necessary.

Keywords: Bili-Bili Dam, seepage, slope stability, geostudio, engineering

Abstrak

Bendungan Bili-Bili di Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan merupakan bendungan rockfill dengan inti tengah yang memiliki kapasitas tampungan total sebesar 375 juta m³ dan kapasitas tampungan sedimen sebesar 29 juta m³. Ditinjau dari risiko bahaya yang tinggi terhadap kegagalan konstruksi, Bendungan Bili-Bili masuk dalam klasifikasi IV (Ekstrem). Dalam perkembangan terakhir terjadi penurunan stabilitas tubuh bendungan karena adanya masalah rembesan. Apabila tidak segera ditangani dapat memicu terjadinya piping bahkan keruntuhan sehingga mengancam keberlanjutan fungsi waduk. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi nilai safety factor (SF) pada main dam, right wing dam, dan left wing dam sebagai satu kesatuan struktur tubuh Bendungan Bili-Bili. Pendekatan yang digunakan mencakup metode kualitatif dan kuantitatif, termasuk kajian geologi teknik, serta pemanfaatan Geostudio SEEP/W untuk menganalisis besar rembesan dan SLOPE/W untuk menilai potensi longsor. Hasil analisis diperoleh debit rembesan masih berada dalam batas wajar, dan stabilitas bendungan terhadap gempa OBE tergolong aman. Namun, pada kondisi gempa MDE, nilai faktor keamanan lereng tidak memenuhi standar minimum yang ditetapkan dalam SNI 8064:2016. Oleh karena itu, diperlukan tindakan perbaikan berupa penguatan atau retrofitting pada tubuh bendungan.

Kata kunci: Bendungan Bili-Bili, rembesan, stabilitas lereng, geostudio, engineering

Pendahuluan

Bendungan berguna untuk kelangsungan hidup masyarakat di hilirnya, namun juga menyimpan risiko tinggi yaitu berupa kegagalan atau runtuhnya bendungan (Maretha *et al.*, 2020). Bendungan urugan merupakan salah satu tipe bendungan yang sangat berisiko terhadap keruntuhan yang diakibatkan besarnya beban gempa yang diterima

atau permasalahan geometrik bangunan bendungan itu sendiri (Hamdhani, 2019). Permasalahan ini sangat berpotensi terjadi pada bendungan lama. Syarat kestabilan bendungan adalah faktor keamanan terhadap rembesan (*seepage*) dan kelongsoran lereng (Sundary & Azmery, 2013). Berdasarkan data instrumentasi, dinyatakan bahwa penurunan stabilitas tubuh bendungan terjadi karena adanya masalah rembesan. Kondisi ini dapat

memicu terjadinya *piping* bahkan keruntuhan pada debit tinggi apabila tidak segera dilakukan penanganan sehingga mengancam keberlanjutan fungsi waduk (Achsan, 2015).

Sejumlah penelitian terkait dengan evaluasi debit rembesan pada tubuh bendungan antara lain dilakukan oleh Huda *et al.* (2019), yang menganalisis Bendungan Panohan dengan pemodelan numerik menggunakan *SEEP/W* dan data pengukuran *v-notch*. Penelitian lainnya dilakukan oleh Siswanto dan Suprpto (2019) pada Bendungan Bili-Bili, dengan pendekatan berdasarkan kriteria seepage index dari data rembesan pada kondisi akhir penelitian. Selain itu, Ardiansyah dan Sriyana (2021) menilai debit rembesan di Bendungan Benel menggunakan data *V-notch*, serta mengevaluasinya berdasarkan kriteria penerimaan rembesan dan *seepage index*.

Penelitian yang dilakukan oleh Maretha (2020) membahas stabilitas lereng pada Bendungan Sukamahi dengan mengevaluasi faktor keamanan dalam kondisi tanpa gempa serta saat terjadi gempa OBE. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan sudah memenuhi ketentuan. Namun, saat terjadi gempa dengan tingkat MDE, nilai yang diperoleh belum memenuhi batas minimum yang ditetapkan dalam SNI 8064:2016. Oleh karena itu, perlu penelitian lanjutan dengan pendekatan berupa perubahan pada geometri lereng, konfigurasi zona tipikal bendungan, dan analisis dinamik lainnya sebagaimana dijelaskan oleh Kramer (1996).

Selain itu, Ekasari *et al.*, (2023) meninjau faktor keamanan pada kondisi gempa MDE di Bendungan Banyu Urip menunjukkan hasil yang tidak memenuhi kriteria pada beberapa kondisi. Oleh karena itu, analisis perlu dilanjutkan dengan evaluasi deformasi permanen, serta dilakukan peninjauan terhadap retakan yang terdapat pada tubuh bendungan. Langkah ini penting agar kondisi bendungan tetap dapat terpantau dengan baik, khususnya saat dilakukan kegiatan instrumentasi.

Sebagai studi kasus, penelitian ini fokus pada salah satu bendungan eksisting di Indonesia yang memiliki potensi permasalahan rembesan, yaitu Bendungan Bili-Bili yang terletak di Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Secara geografis, bendungan ini berada pada koordinat 5°15' LS dan 119°37' BT. Pembangunan bendungan dimulai pada tahun 1992, dengan proses pengisian awal waduk (*impounding*) pada 27 November 1997, dan limpasan air pertama kali melalui bangunan pelimpah (*spillway*) terjadi pada 6 Juli 1999. Bendungan Bili-Bili memiliki manfaat untuk pengendalian banjir Sungai Jeneberang, penyediaan

air baku, Pelayanan air untuk irigasi, Potensi PLTA, Pariwisata Olahraga Air, dan Perikanan Tangkap (BBWS Pompengan Jeneberang, 2022). Dalam perkembangan terakhir terjadi penurunan stabilitas tubuh bendungan karena adanya masalah rembesan (Melani *et.al*, 2024).

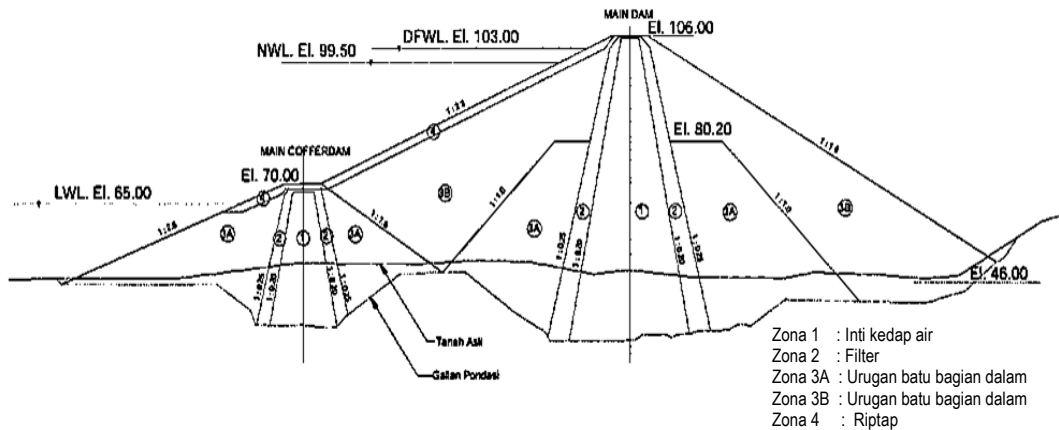
Memperhatikan permasalahan tersebut, diperlukan analisis stabilitas Bendungan Bili-Bili terhadap keamanan bendungan dengan meninjau aspek rembesan dan aspek stabilitas lereng, menggunakan *software Geostudio SEEP/W* dan *SLOPE/W*. Penelitian ini dilakukan pada 3 bagian tubuh bendungan utama yaitu *left wing dam*, *main dam*, dan *right wing dam* sehingga data analisis yang diperoleh lebih detil dan lebih menggambarkan kenyataan kondisi tubuh bendungan di lapangan.

Meskipun pemantauan rembesan menjadi bagian dari kegiatan operasional bendungan, masih terdapat keterbatasan dalam analisis kuantitatif terhadap tren rembesan dan implikasinya terhadap stabilitas struktur bendungan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk memberikan evaluasi lebih sistematis terhadap bendungan lama yang sudah beroperasi sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan dalam manajemen keselamatan bendungan secara akurat dan berbasis data sehingga permasalahan tersebut dapat diminimalisasi dan segera dilakukan tindakan penanganan.

Metode Penelitian

Tujuan penelitian ini menganalisis rembesan dengan menggunakan *software SEEP/W* dan stabilitasnya dengan *SLOPE/W* pada *left wing dam*, *main dam*, dan *right wing dam* yang merupakan satu kesatuan konstruksi bagian dari tubuh Bendungan Bili-Bili. Data yang digunakan diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang dan Balai Teknik Bendungan. Data tersebut adalah: (1) Data Teknis Bendungan Bili-Bili Tahun 2024, (2) Data geometri bendungan dari gambar *as built drawing* Tahun 2024. (3) Data pencatatan muka air waduk Tahun 2022-2024. (4) Data parameter tanah Tahun 2022, dan (5) Data pencatatan Instrumentasi *V-notch* tahun 2022-2024 untuk monitoring besar debit rembesan.

Bendungan Bili-Bili merupakan bendungan tipe urugan batu (*rockfill*) yang didesain dengan Elevasi Banjir Rencana pada +103,00 m, Elevasi Muka Air Tertinggi pada +101,70 m, Elevasi Muka Air Normal pada +99,50 m, dan Elevasi Muka Air Terendah pada +65,00 m. Potongan melintang tubuh Bendungan Bili-Bili dapat dilihat pada Gambar 1.



Sumber: CTI Engineering Co et al., 1988

Gambar 1. Potongan melintang *main dam* Bendungan Bili-Bili

Tiga bagian bendungan utama, yang dicek stabilitasnya sesuai Gambar 1, yaitu: (1) Bendungan utama (*main dam*) dengan ketinggian di atas pondasi 73 m, panjang puncak 750 m, lebar puncak 10 m dan elevasi puncak +106,00 m. (2) Bendungan sayap kanan (*right wing dam*) dengan ketinggian di atas pondasi 52 m, panjang puncak 412 m, lebar puncak 10 m dengan elevasi puncak +106,00 m, dan (3) Bendungan sayap kiri (*left wing dam*) dengan ketinggian di atas pondasi 42 m, panjang puncak 646 m, lebar puncak 10 m dengan elevasi puncak +106,00 m. Langkah analisis yang dilakukan mencakup 4 (empat) tahap, yaitu analisis rembesan, pemodelan rembesan, analisis stabilitas lereng, dan pemodelan stabilitas lereng.

Analisis rembesan

Analisis rembesan dilakukan dengan mengkaji kondisi parameter tanah yang ada, dan dilakukan kontrol terhadap data pencatatan muka air waduk dan *piezometer*. Asumsi dan kriteria yang digunakan dalam analisis stabilitas adalah: tanah dianggap homogen dan seragam/isotropis, aliran air rembesan bersifat laminar sehingga berlaku Hukum Darcy, menghitung *exit gradient* dan faktor keamanan terhadap *piping* sesuai dengan Persamaan (1) dan (2).

$$FK = \frac{I_c}{I_e} \geq 4 \quad (1)$$

$$I_e = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2)$$

Dimana I_c adalah *exit gradient* kritis, I_e adalah *exit gradient* hasil analisis rembesan atau instrument *piezometer*, γ adalah berat isi efektif terendam (ton/m^3), γ_w adalah berat isi air (ton/m^3), G_s adalah berat spesifik dan E adalah angka pori.

Pemodelan rembesan menggunakan *software SEEP/W* untuk menganalisis aliran rembesan

melalui tubuh bendungan dan pondasi, serta mengevaluasi potensi terjadinya *piping* akibat pengaruh tekanan pori.

Analisis stabilitas lereng

Stabilitas lereng menjadi aspek penting dalam pekerjaan geoteknik karena berkaitan langsung dengan keselamatan manusia dan kelangsungan aktivitas konstruksi. Secara umum, ketidakstabilan lereng disebabkan oleh pengaruh gaya gravitasi serta aliran rembesan air (Craig, R.F & Susilo, B., 1989). Dalam pelaksanaan analisis stabilitas lereng ini, beban gempa dilakukan menggunakan metode pseudostatis, di mana dasar perhitungan ini mengacu pada Keputusan Dirjen SDA tahun 2008 tentang Analisis Dinamis Bendungan Urugan. Analisis ini menggunakan data dan kriteria sebagai berikut: (a) parameter material dari timbunan dan tanah pondasi, serta (b) penentuan beban gempa yang dilakukan melalui pendekatan statik dan dinamik (Chopra, 1995). Nilai koefisien gempa yang dijabarkan dalam Pedoman (Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah, 2004) perlu disesuaikan menggunakan metode *Seismic Design Guideline for Fill Dam* (Fata & Suhartanto, 2018).

Goncangan gempa untuk desain sebuah bendungan harus mencakup *Operationing Basis Earthquake* (OBE) dan gempa desain maksimum yang mempertimbangkan beban pada kombinasi ekstrim atau yang disebut *Maximum Design Earthquake* (MDE), selanjutnya analisis tersebut dikombinasikan dengan jenis beban yang diperkirakan terjadi selama masa operasional rutin bendungan (Tanjung *et al.*, 2018). Dasar perhitungan metode pseudostatis yaitu menentukan kelas risiko gempa sesuai kondisi daerah di Bendungan Bili-Bili sesuai dengan Persamaan (3).

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (3)$$

Dimana FR_k adalah Faktor risiko kapasitas tampungan bendungan, FR_t adalah Faktor risiko tinggi bendungan, FR_e adalah Faktor risiko kebutuhan evakuasi orang, dan FR_h adalah Faktor risiko tingkat kerusakan hilir

Pemodelan stabilitas lereng

Dalam menganalisis stabilitas lereng tubuh bendungan pada berbagai kondisi, baik normal maupun saat terjadi penurunan muka air atau gempa, dengan menghitung nilai faktor keamanan (*safety factor*) yang diperoleh dari *software SLOPE/W*. Penentuan kekuatan geser dilakukan menggunakan kriteria keruntuhan dari Mohr-Coulomb dengan pendekatan tegangan efektif, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (4). Penentuan klasifikasi dasar pondasi dilakukan dengan terlebih dahulu yang diperoleh dengan mengalikan nilai percepatan gempa dasar (PGA)

berdasarkan grafik untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 10 tahun dengan faktor amplifikasi PGA (FPGA).

$$S' = c' + (\sigma - \mu) \tan \emptyset \quad (4)$$

Dimana S' adalah Kekuatan geser efektif (ton/m^2), c' adalah Kohesi efektif (ton/m^2), σ adalah Tegangan normal total (ton/m^2), μ adalah Tekanan air pori dan $\emptyset$ adalah Sudut geser dalam efektif ($^\circ$)

Besarnya FGPA tergantung dari klasifikasi lokasi yang didasarkan pada Tabel 4; (c) Penentuan faktor keamanan (FK) pada bendungan urugan umumnya dilakukan dengan menganalisis stabilitas lereng hulu dan lereng hilir dalam berbagai kondisi kritis. Kondisi-kondisi tersebut meliputi tahap akhir konstruksi, muka air normal (*steady state seepage*), surut cepat (*rapid drawdown*), serta kondisi gempa menggunakan pendekatan pseudo-statik (Nanda & Hamdhan, 2016).

Tabel 1. Persyaratan faktor keamanan (FK) minimum untuk stabilitas bendungan tipe urugan()

No	Kondisi	Kuat geser	Tekanan air	FK tanpa gempa	FK dengan gempa*
1	Selesai pembangunan tergantung dari jadwal pembangunan dan tekanan pori dan waktu	Efektif	Dihitung menggunakan data laboratorium dan instrumentasi	1,30	1,20
			Idem hanya tanpa pengawasan instrumen	1,40	1,20
			Hanya pada timbunan tanpa data laboratorium dan dengan/tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
		Total	Tanpa instrumen	1,30	1,20
2	Aliran langgeng ditentukan oleh elevasi muka air normal di sisi hulu dan hilir bendungan. Untuk kondisi gempa tanpa kerusakan, digunakan seluruh (100%) nilai koefisien gempa desain.	Efektif	Berdasarkan analisa rembesan	1,50	1,20
3	Pengoperasian waduk tergantung pada elevasi muka air normal pada hulu dan hilir. Lereng harus dianalisis untuk kondisi surut cepat	Efektif	Surut cepat dari elevasi muka air normal hingga minimum.	1,30	1,10
			Surut cepat dari elevasi muka air maksimum hingga minimum. Pengaruh gempa 0% dari koefisien desain.	1,30	-
4	Kondisi darurat tergantung: sistem drainase, surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan surut cepat keperluan darurat	Efektif	Surut cepat dari elevasi muka air maksimum sampai minimum bangunan pengeluaran. Abaikan beban gempa.	1,20	-

*) untuk OBE; sedangkan **) untuk MDE, $FK \geq 1$

Sumber : Dirjen SDA, 2008

Tabel 2. Kriteria faktor risiko untuk evaluasi keamanan bendungan

Faktor risiko	Angka (bobot)				
	Ekstrim	Tinggi	Moderat	Rendah	
Kapasitas (juta m ³) atau FR _k	>100 (6)	100-1,25 (4)	1,00-0,125 (2)	<0,125 (0)	
Tinggi (m) atau FR _t	>45 (6)	45-30 (4)	30-15 (2)	<15 (0)	
Kebutuhan evakuasi (orang) atau FR _e	>1000 (12)	1000-100 (8)	100-1 (4)	0 (0)	
Tingkat kerusakan hilir atau FR _h	Sangat tinggi (12)	Tinggi (10)	Agak tinggi (8)	Moderat (4)	Tidak ada (0)

Sumber: Dirjen SDA, 2008

Tabel 3. Kriteria beban gempa untuk desain bendungan

Kelas risiko	Persyaratan tanpa kerusakan		Persyaratan diperkenankan kerusakan tanpa keruntuhan	
	T (tahun)	Metode analisis	T (tahun)	Metode analisis
IV N=50-100	100-200 ad ≥ 0,1 g	Koefisien gempa	10000 (MDE)	Koefisien gempa atau dinamik*
III N=50-100	50-100 ad ≥ 0,1 g	Koefisien gempa	5000 (MDE)	Koefisien gempa atau dinamik*
II N=50-100	50-100 ad ≥ 0,1 g	Koefisien gempa	3000 (MDE)	Koefisien gempa atau dinamik*
I N=50-100	50-100 ad ≥ 0,1 g	Koefisien gempa	1000 (MDE)	Koefisien gempa atau dinamik*

*) untuk bendungan besar dengan kondisi geologi setempat yang khusus, peta zona gempa tidak dapat digunakan dan perlu dilakukan studi gempa tersendiri. analisis dinamik dapat dilakukan dengan analisis ragam sambutan gempa atau sejarah waktu percepatan gempa.

Sumber: Dirjen SDA, 2008

Tabel 4. Parameter tanah Bendungan Bili-Bili

Uraian	Zona	Permeabilitas-K (cm/det)	γ _{sat} (kN/m ³)	γ _{wet} (kN/m ³)	Kohesi-C (kN/m ²)	Ø (°)
Tubuh bendungan :						
Inti kedap air	1	4,98 x 10 ⁻⁶	20,0	19,0	20,0	20
Filter	2	3,50 x 10 ⁻³	22,0	20,5	-	35
Urugan batu bagian dalam	3A	-	22,0	20,5	-	38
Urugan batu bagian luar	3B	-	22,5	20,5	-	38
Rip-rap	4	-	22,5	20,5	-	38
Pondasi <i>main dam</i> (MD) :						
Diorite, diabase	pondasi	2,00 x 10 ⁻⁶	29,0	29,0	-	55
Kerikil sungai	pondasi	1,00 x 10 ⁻²	22,0	20,5	-	35
Pelapukan diabase lempungan	pondasi	1,90 x 10 ⁻⁵	17,5	16,5	50,0	17
Pelapukan diabase pasir	pondasi	1,90 x 10 ⁻⁵	19,0	18,0	20,0	30
Pondasi <i>left wing dam</i> (LWD):						
Tufa, tufa lapili	pondasi	1,40 x 10 ⁻⁵	18,0	17,0	-	30
Kerikil sungai	pondasi	1,00 x 10 ⁻²	22,0	20,5	-	35
Pelapukan diabase lempungan	pondasi	1,90 x 10 ⁻⁵	17,5	16,5	50,0	17
Pondasi <i>right wing dam</i> (RWD):						
Tufa, tufa lapili	pondasi	1,40 x 10 ⁻⁵	18,0	17,0	-	30
Pelapukan diabase lempungan	pondasi	1,90 x 10 ⁻⁵	17,5	16,5	50,0	17

Sumber: BBWS Pompa Jeneberang, 2020

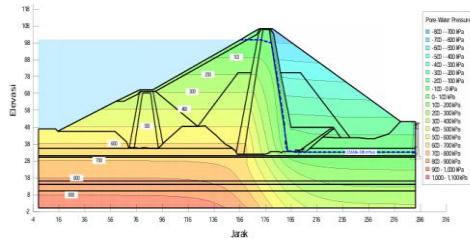
Berdasarkan SNI 8064-2016, bahwa nilai faktor keamanan minimum yang disyaratkan untuk analisis beban gempa dengan metode Pseudostatis pada bendungan urugan selesai konstruksi adalah sebesar 1,20 (OBE) dan 1,00 (MDE). Kriteria analisis beserta batas minimum faktor keamanan pada

berbagai kondisi disajikan dalam Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4. Faktor keamanan ini dinyatakan melalui Persamaan (5).

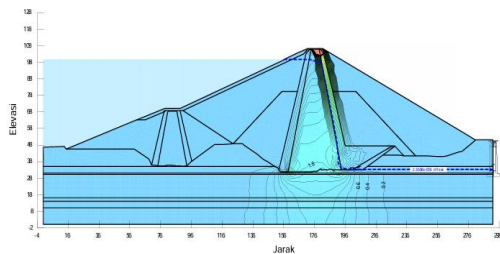
$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{\text{Kuat Geser}}{\text{Tegangan Geser}} \geq 1 \quad (5)$$

Hasil dan Pembahasan

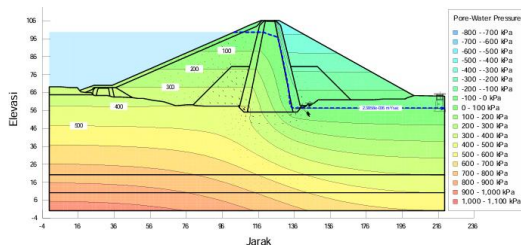
Parameter permeabilitas diambil dari hasil pengujian *quality control* saat pelaksanaan konstruksi sesuai Tabel 5. Rembesan (*seepage*) Bendungan Bili-Bili dianalisis menggunakan *software Geostudio SEEP/W* dan diperoleh kontur *exit gradient* dan debit rembesan sesuai Tabel 6. Adapun hasil analisis rembesan pada *main dam* ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3, *right wing dam* ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, serta Hasil analisis rembesan pada *left wing dam* ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



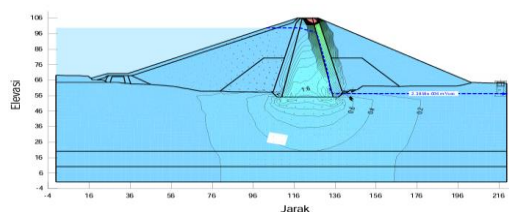
Gambar 2. Kontur tekanan air pori pada *main dam* di MAN +99,5



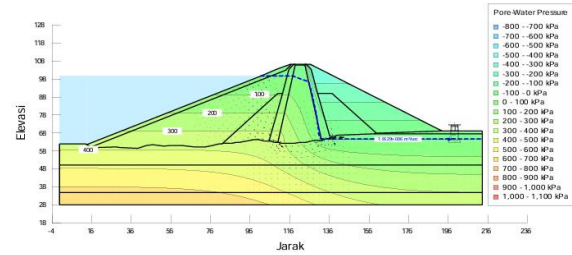
Gambar 3. Kontur gradien hidraulik (*exit gradient*) dan debit rembesan pada *main dam* di MAN +99,5



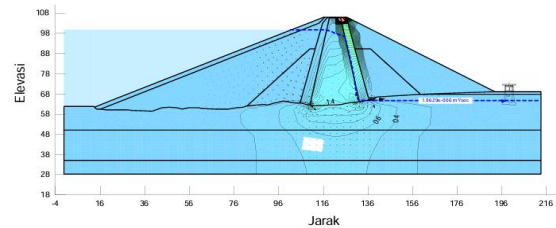
Gambar 4. Kontur tekanan air pori pada *right wing dam* di MAN +99,5



Gambar 5. Kontur Gradien Hidraulik (*exit gradient*) dan debit rembesan pada *right wing dam* di MAN +99,5



Gambar 6. Kontur tekanan air pori pada *left wing dam* di MAN +99,5



Gambar 7. Kontur gradien hidraulik (*exit gradient*) dan debit rembesan pada *left wing dam* di MAN +99,5

Tabel 5. Parameter koefisien kelulusan air untuk analisis rembesan

Uraian	Zona	K (cm/det)
Tubuh bendungan		
Inti kedap air	1	$4,98 \times 10^{-6}$
Filter	2	$3,50 \times 10^{-3}$
Urugan batu dalam	3A	-
Urugan batu luar	3B	-
Rip-rap	4	-
Pondasi <i>main dam</i> (MD)		
Diorite, diabase	pondasi	$2,00 \times 10^{-6}$
Kerikil sungai	pondasi	$1,00 \times 10^{-2}$
Pelapukan diabase	pondasi	$1,90 \times 10^{-5}$
lempungan		
Pelapukan diabase	pondasi	$1,90 \times 10^{-5}$
pasiran		
Pondasi <i>Left wing dam</i> (LWD)		
Tufa, tufa lapili	pondasi	$1,40 \times 10^{-5}$
Kerikil sungai	pondasi	$1,00 \times 10^{-2}$
Pelapukan diabase	pondasi	$1,90 \times 10^{-5}$
lempungan		
Pondasi <i>Right wing dam</i> (RWD)		
Tufa, tufa lapili	pondasi	$1,40 \times 10^{-5}$
Pelapukan diabase	pondasi	$1,90 \times 10^{-5}$
lempungan		

Sumber: BBWS Pompengan Jeneberang, 2020

Penentuan faktor risiko dan klasifikasi batuan

Mengacu hasil analisis kelas risiko sesuai Tabel 7 maka kriteria gempa yang digunakan yaitu Kelas IV (ekstrim). Persyaratan tanpa kerusakan, adalah $T=200$ tahun, $ad \geq 0,1g$ dimana metode analisis menggunakan koefisien gempa. Persyaratan yang diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan

yaitu pada T-10.000 tahun dengan metode analisis menggunakan koefisien gempa atau dinamik.

Tabel 6. Hasil analisis rembesan dan faktor keamanan

Komponen	MD	LWD	RWD
Exit gradient (Ie)	0,48	0,33	0,44
Faktor keamanan (Ic/Ie)	3,92	6,06	4,54
Status keamanan	Tidak aman	Aman	Aman
Debit rembesan MAN (liter/det)	1,78	0,98	1,27
Debit rembesan MAB (liter/det)	1,85	1,06	1,39

Tabel 7. Penentuan kelas risiko Bendungan Bili-Bili

No	Pengaruh Risiko	Ukuran	Faktor risiko	Bobot
1	Kapasitas (juta m ³)	375	FR _k	6
2	Tinggi (m)	73	FR _t	6
3	Kebutuhan Evakuasi (orang)	480.000	FR _e	12
4	Tingkat kerusakan hilir	Agak tinggi	FR _h	8
Total (FR _{tot})				32
Klasifikasi				IV (Ekstrim)

Tabel 8. Hasil perhitungan koefisien tekanan tanah (K)

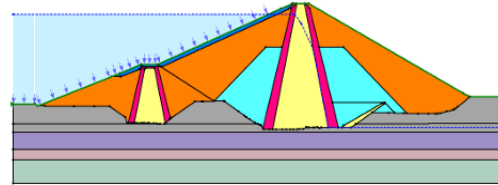
y/H	K
Pada T200 tahun dengan PGA=0,05g	
0,25	$K_o \times [2,5 - (1,85 \times (y/H))] = 0,051$
0,50	$K_o \times [2,0 - (0,60 \times (y/H))] = 0,043$
0,75	$K_o \times [2,0 - (0,60 \times (y/H))] = 0,039$
1,00	$K_o \times [2,0 - (0,60 \times (y/H))] = 0,035$
Pada T10.000 tahun dengan PGA=0,2g	
0,25	$K_o \times [2,5 - (1,85 \times (y/H))] = 0,204$
0,50	$K_o \times [2,0 - (0,60 \times (y/H))] = 0,170$
0,75	$K_o \times [2,0 - (0,60 \times (y/H))] = 0,155$
1,00	$K_o \times [2,0 - (0,60 \times (y/H))] = 0,140$

Memperhatikan Bendungan Bili-bili masuk klasifikasi IV (ekstrim) dengan masa guna 100 tahun, maka analisis T200 tahun menggunakan nilai PGA=0,05 dan sebagai koreksi T10.000 tahun menggunakan nilai PGA=0,2. Klasifikasi dasar pondasi Bendungan Bili-Bili adalah batuan (S_B) dengan S_{GPA} = 1,0 sehingga diperoleh hasil: Pada T200 tahun dengan PGA=0,05g diperoleh PGA_M = S_{GPA} x PGA = 1,0 x 0,05 = 0,05; dan K_o = α₃ x PGA_M = 0,5 x 0,05 = 0,025. Pada T10.000 tahun dengan PGA=0,2g diperoleh, PGA_M = 1,0 x 0,2 = 0,20; dan K_o = 0,5 x 0,20 = 0,10. Maka nilai

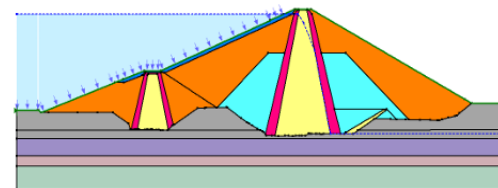
Koefisien tekanan tanah (K) dengan berbagai nilai y/H sebagai disajikan pada Tabel 8.

Hasil analisis stabilitas bendungan

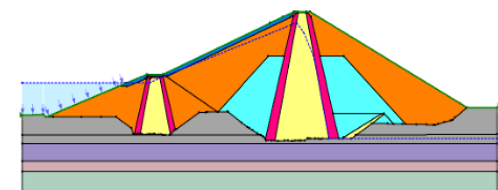
Contoh hasil pemodelan dengan beberapa kondisi, diperlihatkan pada Gambar 8-15. Rekapitulasi hasil analisis stabilitas lereng pada *Main dam*, *Right wing dam*, dan *Left wing dam* baik untuk kondisi tanpa gempa maupun kondisi dengan gempa OBE dan MDE, disajikan pada Tabel 9 hingga Tabel 11.



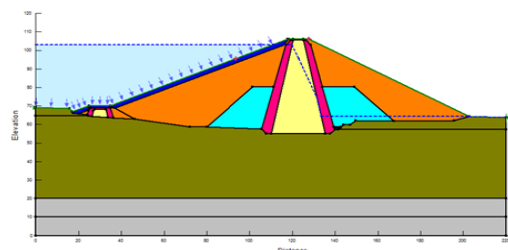
Gambar 8. Main dam dengan muka air normal dan debit rembesan tetap / terisi penuh



Gambar 9. Main dam dengan muka air maksimum/banjir dan debit rembesan tetap



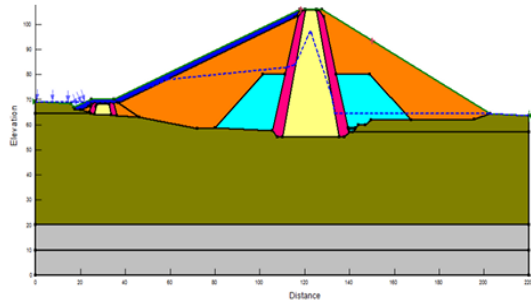
Gambar 10. Main dam dengan kondisi muka air surut cepat



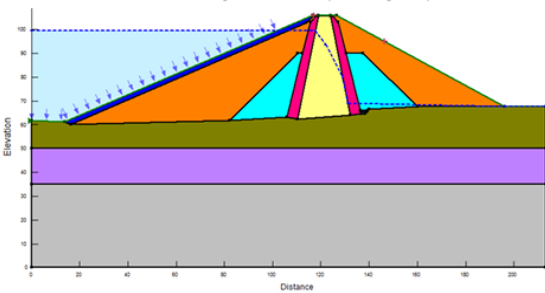
Gambar 11. Right wing dam dengan muka air maksimum/banjir dan debit rembesan tetap

Berdasarkan Tabel 9, stabilitas lereng dengan kondisi tanpa gempa maupun dengan koefisien gempa OBE dan MDE didapat angka keamanan (SF) < SF_{izin}. Sesuai syarat SNI 8064-2016 maka stabilitas Bendungan Bili-Bili tanpa koefisien gempa termodifikasi masuk kedalam kriteria “tidak aman”. Oleh karena itu diperlukan upaya perkuatan

atau perbaikan desain guna meningkatkan stabilitas keamanan bendungan, seperti modifikasi geometri lereng, pemasangan perkuatan mekanis, atau pengendalian muka air waduk, maupun kegiatan *retrofitting* bendungan.



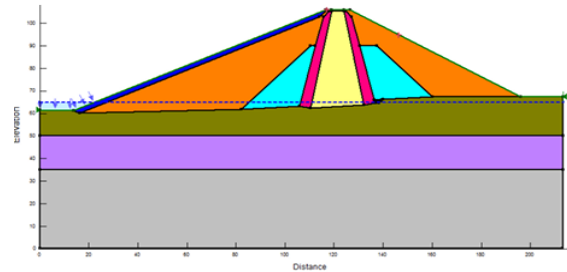
Gambar 12. *Right wing dam* dengan kondisi muka air surut cepat



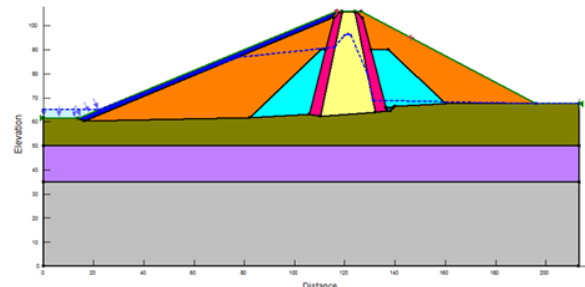
Gambar 13. *Left wing dam* dengan muka air normal dan debit rembesan tetap/terisi penuh

Tampak pada Tabel 10, stabilitas lereng dengan koefisien gempa OBE termodifikasi semuanya memenuhi angka keamanan ($SF > SF_{izin}$). Sesuai syarat SNI 8064-2016 maka stabilitas Bendungan

Bili-Bili dengan koefisien gempa OBE termodifikasi masuk kriteria “aman”. Demikian pula tampak pada Tabel 11, stabilitas lereng pada *main dam* dan *left wing dam* dengan koefisien gempa MDE termodifikasi tidak memenuhi angka keamanan ($SF > SF_{izin}$). Sesuai syarat SNI 8064-2016 maka stabilitas Bendungan Bili-Bili dengan koefisien gempa MDE termodifikasi masuk kriteria “Tidak Aman”. Oleh karena itu juga perlu dilakukan penanganan berupa perkuatan pada tubuh bendungannya.



Gambar 14. *Left wing dam* dengan muka air rendah dan debit rembesan tetap



Gambar 15. *Left wing dam* dengan kondisi muka air surut cepat

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Analisis Stabilitas Lereng dengan Kondisi Tanpa Gempa

No	Kondisi	Tanpa Gempa		Dengan Gempa OBE		Dengan Gempa MDE	
		Hulu	Hilir	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir
Main dam dengan kondisi tanpa beban gempa OBE dan MDE							
1	Muka air banjir (MAB)	1,928	1,388	1,498	1,240	0,929	0,970
2	Muka air normal (MAN)	2,043	1,547	1,605	1,385	1,002	1,072
3	Muka air rendah (MAR)	1,559	1,389	1,372	1,241	0,934	0,948
4	Rapid drawdown	1,184	1,503	1,018	1,345	0,734	1,032
Right wing dam dengan kondisi tanpa beban gempa OBE dan MDE							
1	Muka air banjir (MAB)	2,080	1,487	1,657	1,349	1,067	1,036
2	Muka air normal (MAN)	2,033	1,497	1,641	1,357	1,073	1,070
3	Muka air rendah (MAR)	1,977	1,552	1,743	1,376	1,328	1,062
4	Rapid drawdown	1,516	1,534	1,349	1,391	1,056	1,099
Left wing dam dengan kondisi tanpa beban gempa OBE dan MDE							
1	Muka air banjir (MAB)	0,864	1,496	1,504	1,325	0,996	1,040
2	Muka air normal (MAN)	1,794	1,473	1,468	1,329	0,985	1,042
3	Muka air rendah (MAR)	1,645	1,542	1,458	1,377	1,111	1,054
4	Rapid drawdown	1,164	1,542	1,045	1,307	0,820	1,024
Keterangan:							
Warna abu-abu		Nilai SF < S _{izin} (1,3)					

Tabel 10. Rekapitulasi hasil analisis stabilitas lereng dengan koefisien gempa OBE termodifikasi

No	Kondisi	Gempa OBE termodifikasi							
		Hulu				Hilir			
		0,25	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	1,00
Main dam dengan Koefisien Gempa OBE Termodifikasi									
1	Muka air banjir (MAB)	2,036	1,743	1,667	1,604	1,683	1,410	1,270	1,281
2	Muka air normal (MAN)	1,701	1,708	1,612	1,716	1,677	1,555	1,523	1,535
3	Muka air rendah (MAR)	1,920	1,647	1,375	1,389	1,684	1,412	1,271	1,282
4	Rapid drawdown	1,634	1,155	1,032	1,062	1,682	1,410	1,271	1,389
Right wing dam dengan Koefisien Gempa OBE Termodifikasi									
1	Muka air banjir (MAB)	1,956	1,740	1,764	1,762	1,802	1,575	1,507	1,386
2	Muka air normal (MAN)	1,564	1,594	1,683	1,740	1,807	1,575	1,409	1,395
3	Muka air rendah (MAR)	2,118	1,764	1,863	1,805	1,802	1,575	1,409	1,420
4	Rapid drawdown	2,117	1,923	1,477	1,393	1,802	1,575	1,409	1,416
Left wing dam dengan Koefisien Gempa OBE Termodifikasi									
1	Muka air banjir (MAB)	1,843	1,725	1,695	1,594	1,862	1,607	1,529	1,365
2	Muka air normal (MAN)	1,936	1,715	1,689	1,549	1,874	1,608	1,531	1,368
3	Muka air rendah (MAR)	2,182	1,946	1,881	1,509	1,862	1,607	1,529	1,422
4	Rapid drawdown	2,187	1,862	1,484	1,076	1,867	1,607	1,529	1,347

Tabel 11. Rekapitulasi hasil analisis stabilitas lereng dengan koefisien gempa MDE termodifikasi

No		Kondisi	Gempa MDE termodifikasi							
			Hulu				Hilir			
			0,25	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	1,00
Main dam dengan Koefisien Gempa MDE Termodifikasi										
1	Muka air banjir (MAB)	1,323	1,168	1,109	1,088	1,274	1,105	1,018	1,044	
2	Muka air normal (MAN)	1,210	1,188	1,096	1,169	1,281	1,235	1,233	1,263	
3	Muka air rendah (MAR)	1,395	1,256	1,142	1,056	1,275	1,106	1,019	1,045	
4	Rapid drawdown	1,220	0,910	0,810	0,825	1,274	1,106	1,019	1,137	
Right wing dam dengan Koefisien Gempa MDE Termodifikasi										
1	Muka air banjir (MAB)	1,300	1,184	1,225	1,237	1,338	1,235	1,208	1,143	
2	Muka air normal (MAN)	1,111	1,106	1,176	1,238	1,342	1,235	1,133	1,165	
3	Muka air rendah (MAR)	1,527	1,366	1,463	1,460	1,338	1,235	1,134	1,159	
4	Rapid drawdown	1,527	1,466	1,210	1,210	1,338	1,235	1,133	1,159	
Left wing dam dengan Koefisien Gempa MDE Termodifikasi										
1	Muka air banjir (MAB)	1,247	1,180	1,180	1,142	1,375	1,252	1,224	1,134	
2	Muka air normal (MAN)	1,384	1,221	1,200	1,125	1,384	1,258	1,226	1,139	
3	Muka air rendah (MAR)	1,564	1,481	1,469	1,223	1,375	1,255	1,224	1,163	
4	Rapid drawdown	1,524	1,482	1,188	0,894	1,379	1,255	1,224	1,118	

Keterangan:

Warna abu-abu Nilai SF < S_{izin} (1,3)

Kesimpulan

Dari analisis rembesan dan stabilitas dapat disimpulkan terhadap *piping* pada *main dam* sebesar 3,92 (tidak aman), *right wing dam* sebesar 6,06 (aman), dan *left wing dam* sebesar 4,54 (aman). Hasil analisis kelas risiko maka Bendungan Bili-Bili masuk Klasifikasi IV (ekstrim). Berdasarkan syarat faktor keamanan, stabilitas lereng pada SNI 8064-2016 disimpulkan bahwa stabilitas Bendungan Bili-Bili dengan koefisien gempa OBE termodifikasi masuk kriteria “aman” meskipun nilai FK sangat mendekati syarat minimumnya sedangkan dengan koefisien gempa MDE

termodifikasi masuk kriteria “tidak aman” maka disarankan untuk melakukan penanganan terhadap potensi kelongsoran dimana lokasi bendungan tersebut rawan banjir dan tanah longsor. Kegiatan yang dapat dilakukan berupa *upgrading* Bendungan Bili-Bili, pengendalian muka air waduk maupun kegiatan *retrofitting* lainnya guna mencegah terganggunya stabilitas bendungan secara keseluruhan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan jurnal ini, khususnya kepada Direktorat

Bendungan dan Danau, Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang, Balai Teknik Bendungan, serta rekan-rekan Magister Superspesialis MRIKB Universitas Diponegoro Angkatan V Tahun 2024.

Daftar Pustaka

Achsan, M. (2015). Analisis dampak kegagalan bendungan akibat rembesan dan piping terhadap kestabilan waduk. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 7(3), 211-220.

Ardiansyah, R. H. & Sriyana, I. (2021). Evaluasi Debit Rembesan dari Data Bacaan *V-notch* pada Bendungan Benel. *Jurnal Politeknik Negeri Semarang*, 26 (2).
<https://doi.org/10.32497/wahanats.v26i2.3134>

Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 8064-2016 tentang Metode analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang. (2020). *Laporan akhir sertifikasi operasi dan pemeliharaan Bendungan Bili-Bili*. Makassar.

Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang. (2022). *Laporan perbaikan sertifikasi operasi dan pemeliharaan Bendungan Bili-Bili*. Makassar.

Chopra, A. K. (1995). *Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice - Hall.

Craig, R.F & Susilo, Budi. 1989. *Mekanika Tanah Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga.

Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah. (2004). *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*.

Dirjen SDA. (2008). *Pedoman Analisis Dinamik Bendungan Urugan*. Jakarta: Komisi Keamanan Bendungan.

Ekasari, S., Halim, A., & Riman. (2023). Studi Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan pada Bendungan Banyu Urip dengan Menggunakan *Software Geostudio* 2018 di Kabupaten Bojonegoro Jawa Timur. *Jurnal Teknik Sipil*, 30(1).
<https://doi.org/10.5614/jts.2023.30.1.14>

Fata, Y. A., & Suhartanto, E. (2018). Analisis Stabilitas Lereng Bendungan Sutami Berdasarkan Peta Gempa 2017. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Pengairan*, 1.

Hamdhani, I. (2019). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elem Hingga Modesl 2D dan 3D. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*.

Huda, A.L., Wardani, S.P.R., Suharyanto, S., (2019). Evaluasi Tekanan Air Pori dan Rembesan Pada Bendungan Panohan. Reka Buana : *Jurnal Imiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 4(2), 26.
<http://dx.doi.org/10.33366/rekabuana.v4i2.1372>

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Mareta L. (2020) Analisis Stabilitas dan Keamanan Bendungan Sukamahi di Provinsi Jawa Barat.

Mareta L., Darsono, S. & Sadono, K., W. (2020) Analisis Stabilitas dan Keamanan Bendungan Ciawi (Dry Dam) di Provinsi Jawa Barat. *Rang Teknik Journal* 3(2),
<https://doi.org/10.31869/rtj.v3i2.1793>

Melani, A., Yusuf, M., I., Sari, F., A., & Ariwi, N., P. (2024). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Margatiga. *Journal of Sustainable Civil Engineering*, 6 (2).
<https://doi.org/10.47080/josce.v6i02.2238>

Nanda, T. N. F., & Hamdhan, I. N. (2016). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D. *Journal Reka Racana*, 2(4).

Tanjung, M. I., Sari, R. N., & Ghafara, R. (2018). Screening analysis stabilitas lereng bendungan urugan akibat gempa di Indonesia. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 8(1), 43–56.

Siswanto & Suprpto. (2019). Evaluation of *Seepage* Discharge on Jatibarang Dam Based on Instrumentation Data Monitoring. *Journal of International Scientific and Technology Research*, 8(8), 799 806.

Sundary, D. & Azmeri, (2013). Kajian Kestabilan Tubuh Waduk Rukoh Kecamatan Titieu Keumala Kabupaten Pidie.