



Studi Efektivitas *Horizontal Drains* terhadap Perbaikan Lereng Hilir Bendungan Lalung, Karanganyar, Jawa Tengah

Nur Faridha Eka Minawati¹, Fikri Faris², Hary Christady Hardiyatmo³

^{1,2,3}Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA
Jalan Grafika No 2 Yogyakarta

ABSTRACT Indonesia has a total of 220 dams, with 189 managed by the Ministry of Public Works and Housing (PUPR), 31 dams managed by non-PUPR entities, and 61 dams currently undergoing construction programs. One of the dams managed by PUPR is the Lalung Dam. The Lalung Dam is an embankment dam that has been in operation since its construction in 1940. However, due to inadequate maintenance of dams and the aging factor of the dams themselves, dams may not function properly, leading to dam failures. If a dam failure were to happen, then rehabilitation would be necessary to restore the dam to its original function and purpose. One of the causes of such failure is due to landslides. The rehabilitation method used to address landslides occurring at the Lalung Dam involves reconfiguring the slope geometry and implementing horizontal drains. An in-depth analysis of the effectiveness of slope geometry reconfiguration and the use of horizontal drains in efforts to increase slope stability at dams was necessary to assess the dam's safety post-rehabilitation. The analysis method used was the finite element method and limit equilibrium method with the assistance of the Geostudio 2023.1.2 version 23.1.2.11 Seep/W and Slope/W applications. The expected output of this study is to determine the safety factor value of the dam after rehabilitation and the safety factor of each combination of downstream slope designs at the Lalung Dam, considering the length and depth of horizontal drains.

KEYWORDS: Embankment Dam, Landslide, Rehabilitation, Horizontal Drains, Slope Stability.

ABSTRAK Indonesia memiliki sebanyak 220 bendungan, dimana 189 dikelola oleh PUPR dan 31 bendungan dikelola oleh non-PUPR, sedangkan 61 bendungan sedang dilakukan program pembangunan. Salah satu bendungan yang dikelola oleh PUPR adalah Bendungan Lalung. Bendungan Lalung merupakan bendungan urugan yang telah lama beroperasi dan dibangun pada tahun 1940. Tetapi, akibat dari pemeliharaan yang kurang sesuai pada bendungan dan pengaruh faktor umur bendungan mengakibatkan bendungan tidak berfungsi dengan baik, sehingga menyebabkan terjadinya kegagalan bendungan. Apabila suatu bendungan mengalami kegagalan bendungan, maka perlu dilakukan rehabilitasi guna memulihkan bendungan ke manfaat dan fungsi seperti keadaan semula. Salah satu penyebab terjadinya kegagalan adalah akibat dari longsor. Rehabilitasi yang digunakan untuk menangani longsor yang terjadi pada Bendungan Lalung berupa penataan geometri lereng dan penggunaan *horizontal drains*. Analisis mendalam tentang efektivitas penataan geometri lereng dan penggunaan *horizontal drains* dalam upaya meningkatkan stabilitas lereng pada bendungan diperlukan untuk mengetahui keamanan bendungan setelah dilakukan rehabilitasi. Metode analisis yang digunakan pada penelitian ini adalah metode elemen hingga (*finite element method*) dan metode elemen hingga (*limit equilibrium method*) menggunakan *software* Geostudio 2023.1.2 version 23.1.2.11 Seep/W dan Slope/W. *Output* yang diharapkan dari penelitian ini adalah mengetahui nilai *safety factor* dari masing-masing kombinasi desain lereng hilir Bendungan Lalung ditinjau dari panjang dan kedalaman *horizontal drains*.

KATA KUNCI: Bendungan Urugan, Longsor, Rehabilitasi, *Horizontal Drains*, Stabilitas Lereng.

1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Menurut Hadimuljono dan Kurniawan (2021) dari data Pusat Bendungan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Republik Indonesia (2020) memberikan informasi bahwa bendungan yang ada saat ini dengan total 189 bendungan yang dikelola oleh PUPR dan 31 bendungan dikelola oleh non-PUPR. Sedangkan 61 bendungan sedang dilakukan program konstruksi oleh PUPR dari tahun 2014 -2019. Bendungan Lalung merupakan bendungan urugan homogen yang telah dibangun sejak tahun 1940. Bendungan urugan adalah suatu bendungan yang dibangun dengan cara menimbunkan bahan-bahan seperti: batu, krakal, kerikil, pasir dan tanah pada komposisi tertentu dengan fungsi sebagai pengempang atau pengangkat permukaan air yang terdapat dalam waduk di hulu (Sosrodarsono dan Takeda, 2016). Bendungan urugan digolongkan dalam tipe homogen, apabila bahan membentuk tubuh bendungan tersebut terdiri dari tanah yang hamper sejenis dan gradasinya hamper seragam. Kelemahan terbesar bendungan urugan adalah tingginya potensi terjadinya longsor yang mengakibatkan jebolnya bendungan tersebut. Bendungan Lalung memiliki luas waduk sebesar 7384 m² dengan jumlah tampungan waduk sebesar 4.40 juta m³ bendungan ini berfungsi sebagai irigasi seluas 2000 ha.

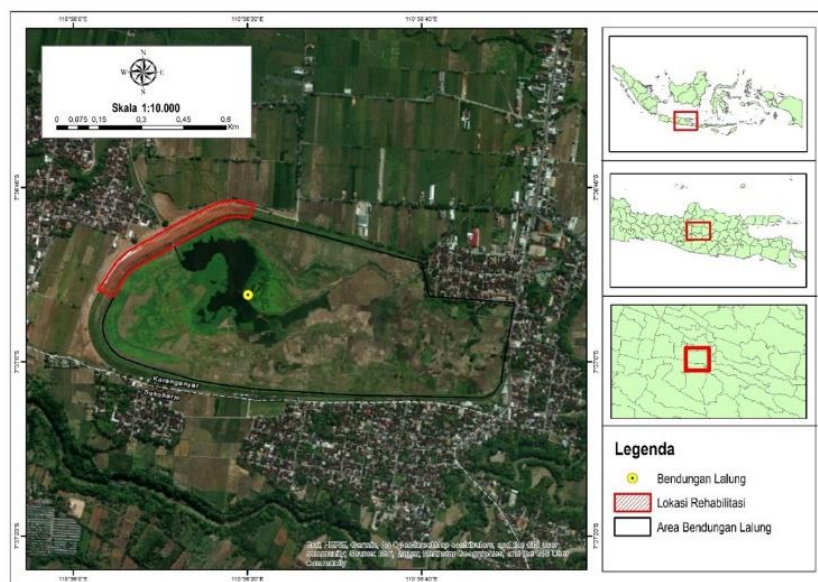
Selama beroperasi Bendungan Lalung telah mengalami 3 kegagalan bendungan yang membuat bendungan tersebut dilakukan 3 kali rehabilitasi. Rehabilitasi ke-1 dilakukan pada tahun 1967 dan rehabilitasi ke-2 dilakukan pada tahun 1998. Berdasarkan kondisi terkini, Bendungan Lalung telah selesai dilakukan rehabilitasi ke-3. Bendungan Lalung dilakukan rehabilitasi ke-3 karena terjadi kegagalan konstruksi berupa terjadi longsor pada lereng hilir bendungan. Longsor yang terjadi pada bendungan bisa mengakibatkan terjadinya banjir bandang yang mana dapat membahayakan masyarakat sekitar Bendungan Lalung, apabila tidak segera dilakukan perbaikan. Mengingat lokasi bendungan yang juga berdekatan dengan pemukiman penduduk. Rehabilitasi yang dilakukan berupa peningkatan stabilitas lereng Bendungan Lalung dengan *horizontal drains* dan merubah geometri lereng. *Horizontal drains* merupakan drainase yang menggabungkan geotekstil dengan bahan agregat seperti kerikil dan batu yang ditempatkan di kaki bendungan urugan guna meningkatkan stabilitas lereng atau hanya ditempatkan untuk mengontrol rembesan secara horizontal (Globo, et al., 2008)

Choudhary, et al., (2018) melakukan penelitian terhadap bendungan urugan tanah di Garada, Bundi, Rajasthan. Dari analisa yang dilakukan disimpulkan bahwa bendungan *existing* memiliki *safety factor* yang lebih rendah pada kondisi tinggi muka air berada pada *full reservoir level (FRL)*. Setelah bendungan *existing* dilakukan rehabilitasi dengan ditambahkan hilir setebal 1,5 meter horizontal dan *chimney filter*. Hasil analisis menunjukkan bahwa bagian bendungan yang direhabilitasi aman untuk semua aliran kondisi yang ditentukan dalam kode IS.

Mengingat bahwa Bendungan Lalung telah mengalami 3 kali kegagalan bendungan sehingga perlu dilakukan 3 kali rehabilitasi, maka perlu dilakukan evaluasi terhadap perbaikan stabilitas lereng hilir dalam upaya meningkatkan stabilitas Bendungan Lalung. Penelitian ini bertujuan mengetahui efektifitas penggunaan *horizontal drains* terhadap perbaikan stabilitas lereng hilir Bendungan Lalung ditinjau dari panjang dan kedalaman *horizontal drains*. Stabilitas lereng dianalisis menggunakan metode kesetimbangan batas menggunakan *software* Geostudio Slope/W dengan garis muka air (*phreatic line*) yang diperoleh dari *software* Geostudio Seep/W.

2 Gambaran Umum Bendungan Lalung

Bendungan Lalung terletak di Dk. Tegalsari, Ds. Lalung, Kec. Karanganyar, Kab. Karanganyar, Jawa Tengah. Dengan koordinat $7^{\circ}36'46.28''\text{S}$ dan $110^{\circ}56'11.50''\text{T}$. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



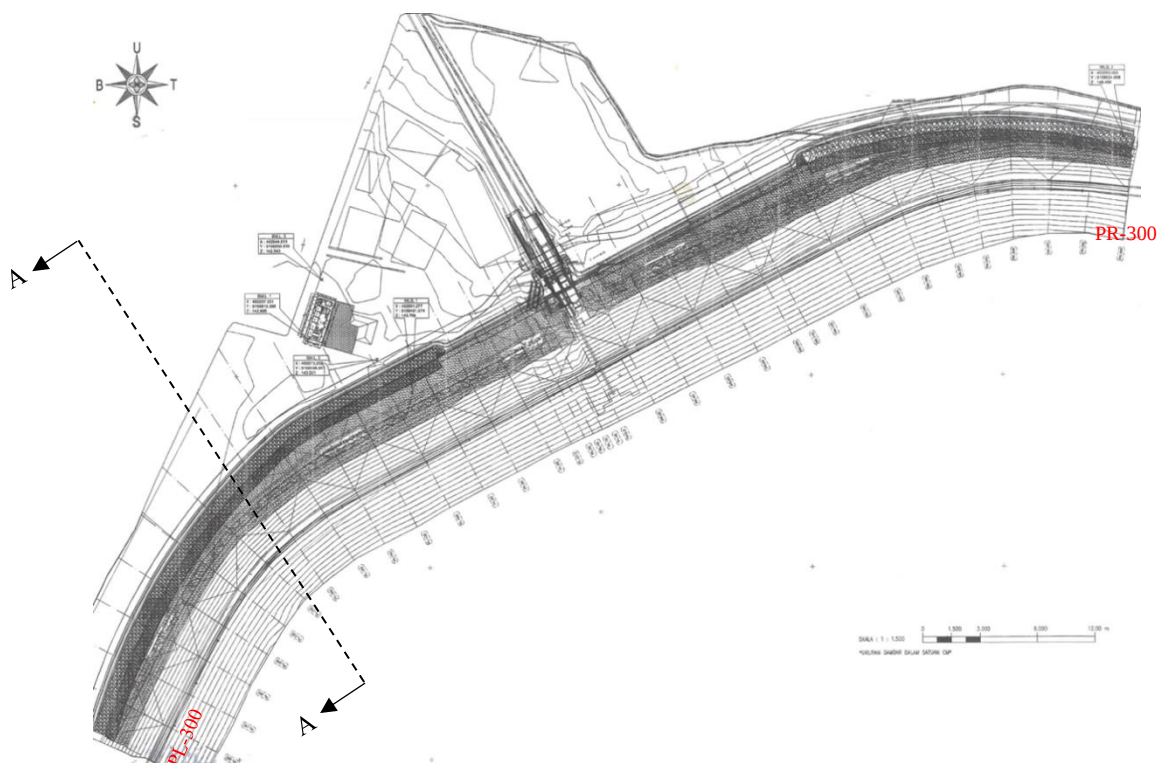
Gambar 1. Peta lokasi rehabilitasi Bendungan Lalung.

(Sumber: peta-hd.com dan data proyek rehabilitasi Bendungan Lalung PT. Taruna Putra Pertiwi)

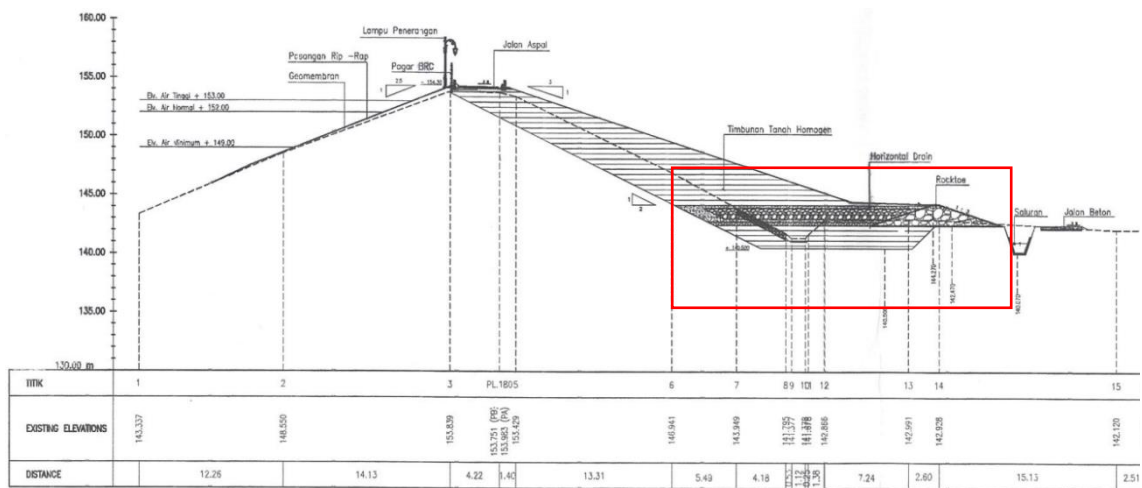
Bendungan Lalung merupakan bendungan urugan homogen yang telah dibangun sejak tahun 1940. Selama beroperasi Bendungan Lalung telah mengalami 3 kali rehabilitasi dikarenakan kegagalan bendungan. Rehabilitasi ke-1 dilakukan pada tahun 1967 dan rehabilitasi ke-2 dilakukan pada tahun 1998. Berdasarkan kondisi terkini, Bendungan Lalung telah selesai dilakukan rehabilitasi ke-3. Rehabilitasi yang dilakukan sebagai upaya peningkatan stabilitas lereng hilir Bendungan Lalung berupa penambahan *horizontal drains* dan penataan geometri lereng hilir bendungan. Pelaksanaan rehabilitasi ke-3 Bendungan Lalung dapat dilihat pada Gambar 2.



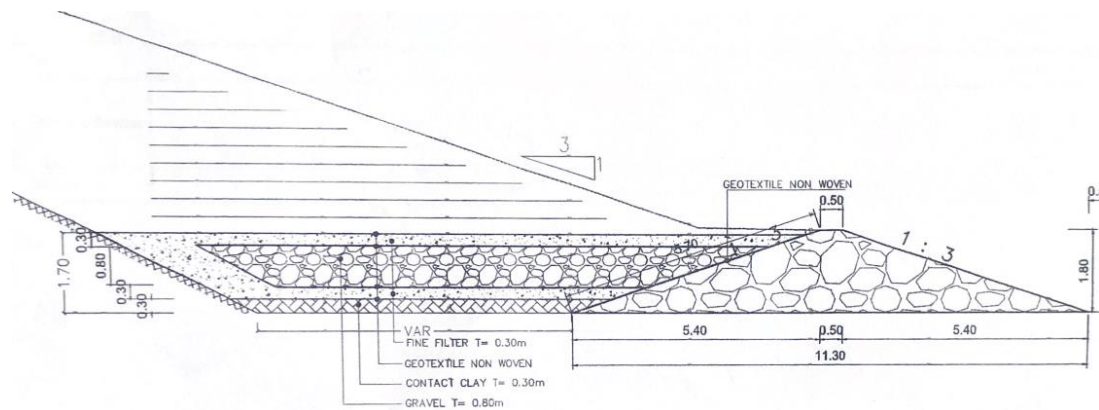
Gambar 2. Pelaksanaan rehabilitasi pada Bendungan Lalung (a) Pengupasan lereng hilir bendungan menggunakan *excavator*. (b) Proses pemadatan material filter (*gravel*) pada *horizontal drains* menggunakan *vibro roller*.



Gambar 3. Lokasi pekerjaan rehabilitasi Bendungan Lalung (PT. Taruna Putra Pertiwi, 2021).



Gambar 4. Potongan A-A Bendungan Lalung setelah direhabilitasi (PT. Taruna Putra Pertiwi, 2021).



Gambar 5. Detail A horizontal drains Bendungan Lalung (PT. Taruna Putra Pertiwi, 2021).

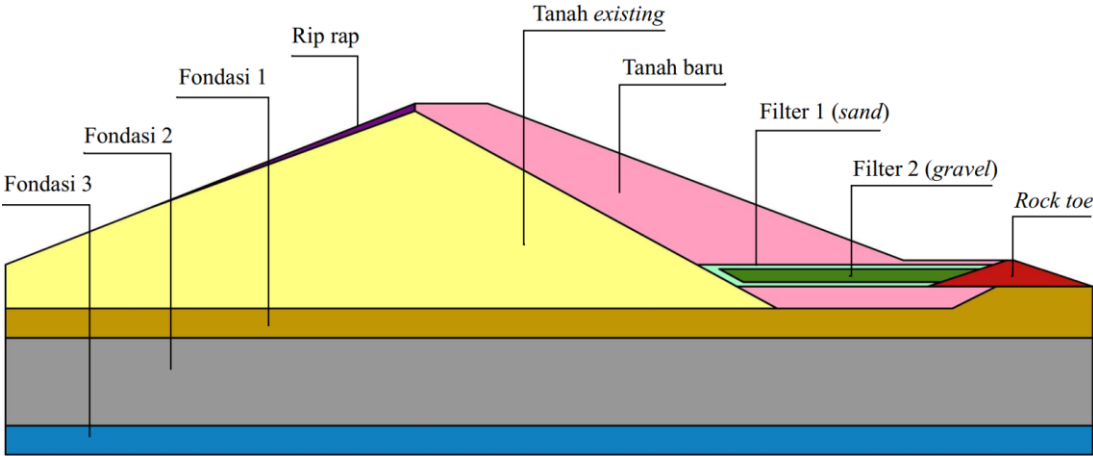
Mengacu pada Gambar 3 pekerjaan rehabilitasi ke-3 Bendungan Lalung dilakukan pada PL-300 sampai PR-300 ditunjukkan pada Gambar 3. Selanjutnya detail potongan A-A ditunjukkan pada Gambar 4 dan detail A *horizontal drains* yang diberi *geotextile non woven* yang ditempatkan pada kedalaman EL +142.00 ditunjukkan pada Gambar 5.

Geotextile non woven digunakankan sebagai filter dan separator (pemisah) material pada *horizontal drains*. Sehingga *horizontal drains* yang dilapisi *geotextile non woven* difungsikan sebagai drainase yang mengalirkan air rembesan yang masuk pada timbunan tubuh bendungan tanpa membuat butiran-butiran tanah ikut terangkut bersama air ke hilir bendungan. Sedangkan material timbunan baru digunakan sebagai *counter weight* dan penambahan kemiringan lereng hilir Bendungan Lalug sebagai akibat dari pengupasan sedalam 1.5 meter sampai 2 meter lapisan tanah yang lemah/lapisan tanah yang longsor dan berpotensi longsor lainnya. Secara umum berikut adalah data teknis mengenai Bendungan Lalung setelah dilakukan rehabilitasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data teknis Bendungan Lalung (PT. Taruna Putra Pertiwi).

No	Keterangan	Data
1	Tipe bendungan	Urugan tanah homogen
2	Elevasi puncak	+154,30 m
3	Lebar puncak	5,00 m
4	Lebar timbunan	74,80 m
5	Tinggi bendungan	12,40 m
6	Luas waduk	7384,00 m ²
7	Tampungan waduk	4,40 Jt m ³
8	Kemiringan lereng hulu	1:2,5
9	Kemiringan lereng hilir	1:3
10	Muka air maksimum	+153,00 m
11	Muka air normal	+152,00 m
12	Muka air minimum	+149,00 m

Tubuh bendungan Lalung terdiri dari beberapa lapisan material yang berbeda. Lapisan penyusun tubuh bendungan meliputi lapisan, timbunan tanah *existing*, timbunan tanah baru, filter *sand*, filter *gravel*, *rock toe*, *rip-rap*. Mengacu pada Gambar 4. Yang telah disederhanakan untuk dilakukan analis dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Ilustrasi pembagian zona material Bendungan Lalung setelah rehabilitasi.

3 Metode Penelitian

3.1 Metode Penelitian

Bendungan Lalung dimodelkan menggunakan penampang pada Gambar 6. Sifat teknik bendungan ditentukan berdasarkan serangkaian data primer dan sekunder yang diperoleh dari PT. Taruna Putra Pertiwi selaku kontraktor proyek rehabilitasi Bedungan Lalung ke-3 tahun 2020-2022 terlihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Dalam melakukan analisis penelitian ini menggunakan *software* Geostudio Seep/W dan Slope/W. Geostudio Seep/W difungsikan untuk memperoleh garis fretik dengan metode elemen hingga, sedangkan Geostudio Slope/W difungsikan sebagai analisis stabilitas lereng dengan metode kesetimbangan batas. Dalam melakukan analisis dengan metode kesetimbangan batas, Slope/W menyediakan berbagai macam metode perhitungan *safety factor* yang dapat dipilih, yaitu: metode Bishop yang disederhanakan (Bishop,1954), metode Janbu (Janbu, 1973), metode Spancer (Spancer,1967), metode Morgenstern-Price (Morgenstern-Price, 1965). Dalam melakukan analisis peneliti menggunakan metode Morgenstern-Price, metode ini dipilih karena mempertimbangkan dua konsep dasar dalam melakukan analisis, yaitu: kesetimbangan gaya dan kesetimbangan momen

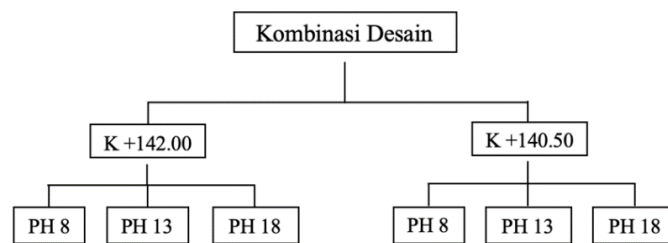


(Abramson et al., 2002). Mengacu pada *Geo-Slope International Ltd (2018) input* yang dibutuhkan Slope/W dalam melakukan analisis stabilitas lereng dengan model kuat geser Mohr-Coloumb adalah:

- Cohesi* (Kpa)
- Phi*
- Unit weight* (kN/m²)

3.2 Pemodelan Penelitian

Pemodelan penelitian berupa kombinasi desain yang penulis teliti adalah *horizontal drains* divariasikan pada kedalaman elevasi +140.50 dan +142.00 dengan panjang *horizontal drains* 8 m, 13 m, 18 m. Kombinasi desain mengacu pada *shop drawing* Bendungan Lalung setelah direhabilitasi tahun terbit 2021. Analisis kombinasi desain ini bertujuan untuk mengetahui penempatan kedalaman dan panjang *horizontal drains* paling efektif yang digunakan sebagai peningkatan stabilitas lereng. *Output* dari variasi pemodelan adalah mengetahui nilai *safety factor*. Analisis dilakukan pada elevasi air bendungan maksimum (+153.00). Bagan pemodelan kombinasi desain lereng hilir Bendungan Lalung dapat dilihat pada Gambar 7. Ilustrasi kombinasi desain lereng hilir Bendungan Lalung dapat dilihat pada Gambar 8.

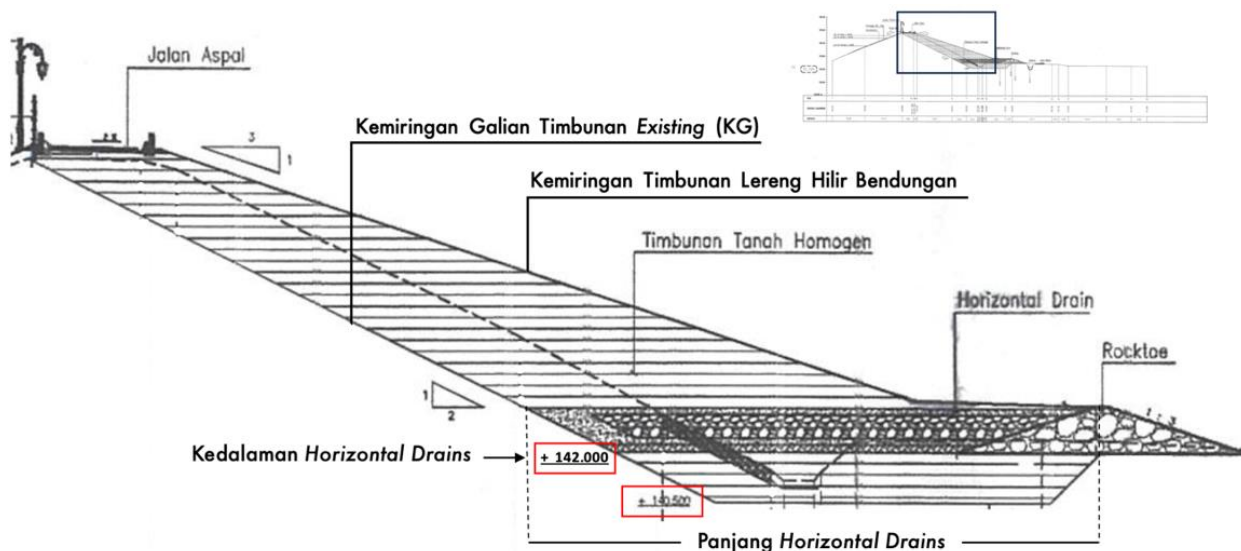


Keterangan:

K = kedalaman *horizontal drains*
PH = panjang *horizontal drains*

Gambar 7. Bagan pemodelan kombinasi desain lereng hilir Bendungan Lalung.

Analisis yang memperhitungkan *seismic load* dimasukkan nilai 0,19. Nilai tersebut diambil dari data laporan konsultan proyek rehabilitasi Bendungan Lalung, yaitu PT. Binatama Wirawredha Konsultan sebagai nilai akibat beban gempa.



Gambar 8. Desain lereng hilir Bendungan Lalung.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Penentuan Analisis

4.1.1 Penentuan tipe analisis

Analisis Seep/W maupun Slope/W dimodelkan secara dua dimensi. Elevasi muka air bendungan yang digunakan dalam analisis adalah elevasi muka air bendungan maksimum (EL +153.00).

- a. Penentuan tipe analisis Geostudio Seep/W
Analisis Seep/W dilakukan pada kondisi *steady state*. Analisis Seep/W difungsikan untuk mengetahui garis freatik.
- b. Penentan tipe analisis stabilitas lereng dengan Geostudio Slope/W
Analisis Slope/W menggunakan asas *limit equilibrium* dengan metode Morgentern-Price. Analisis Slope/W difungsikan untuk mengetahui nilai *safety factor*.

4.1.2 Pemodelan geometri

Pemodelan geometri Seep/W maupun Slope/W disimulasikan mengacu pada gambar Ilustrasi kombinasi desain lereng Bendungan Lalung dapat dilihat pada Gambar 8.

4.1.3 Input material

- a. *Input material analisis Seep/W*
Material dalam analisis Seep/W menggunakan pemodelan *saturate/unsaturated*.. Parameter *input* material yang digunakan dalam analisis rembesan adalah kadar air volumetric untuk material timbunan *existing*, tanah baru, filter 1 (*sand*), *rock toe*, *rip-rap*, fodasi 1, fondasi 2, fondasi 3. Parameter *input* Seep/W dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter input data analisis Seep/W.

Rasio	Parameter	Material Model	Vol. Water Content Function			Hydraulic Conductivity Function			
			Method	Saturate d WC	Sample Materia l	Method	VWC Func	Saturate d kx	ky/kx rasio
1	Tanah Existing	Saturated/unsaturated	Sample function	0,58	Clay	Fredlund-Huang	Tanah Existing	2.84E-07	0,2
2	Tanah Baru	Saturated/unsaturated	Sample function	0,55	Clay	Fredlund-Huang	Tanah Baru	1.10E-08	0,2
3	Filter 1	Saturated/unsaturated	Sample function	0,35	Sand	Fredlund-Huang	Filter 1	1.00E-01	1
4	Rock Toe	Saturated/unsaturated	Sample function	0,25	Gravel	Fredlund-Huang	Rock Toe	1.00E-04	1
5	Rip-rap	Saturated/unsaturated	Sample function	0,25	Gravel	Fredlund-Huang	Rip-rap	1.00E-04	1
6	Fondasi 1	Saturated/unsaturated	Sample function	0,50	Silty clay	Fredlund-Huang	Fondasi 1	4.00E-07	1
7	Fondasi 2	Saturated/unsaturated	Sample function	0,62	Silty clay	Fredlund-Huang	Fondasi 2	6.02E-08	1
8	Fondasi 3	Saturated/unsaturated	Sample function	0,58	Silty clay	Fredlund-Huang	Fondasi 3	4.30E-07	1

- b. *Input material analisis Slope/W*
Material dalam analisis Slope/W Menggunakan model Mohr-Couloum. Parameter yang perlu dimasukkan dalam analisis berupa *unit weight* (γ), *cohesi* (c), sudut geser (ϕ). Parameter material yang diinput dalam analisis Slope/w dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel. 3 Parameter input data analisis Slope/W.

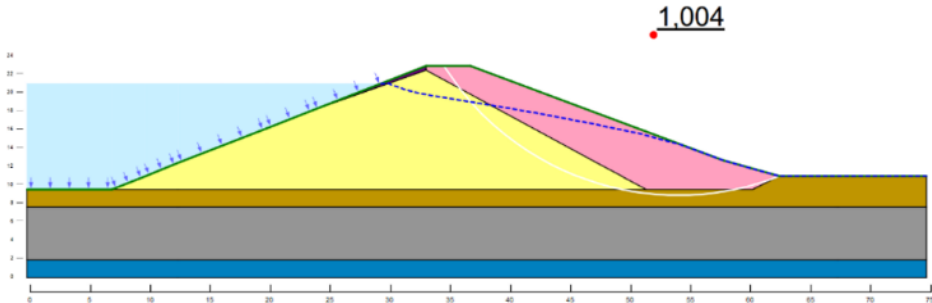
No	Material	γ kN/m ²	c kPa	ϕ °
1	Tanah Existing	18,1	15,2	14,2
2	Tanah Baru	16,8	24,5	20
3	Filter 1 (<i>sand</i>)	19	0	36
4	Rock Toe	21	0	45
5	Rip-rap	21	0	45
6	Fondasi 1	18	25,5	15
7	Fondasi 2	19	31,4	19
8	Fondasi 3	15,9	37,3	13

4.2 Analisis Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Lalung

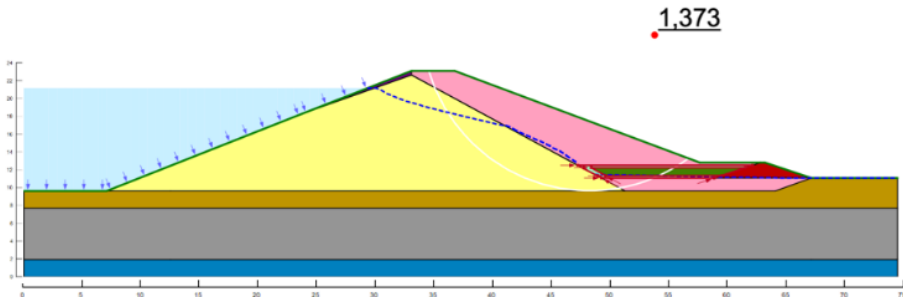
Tujuan dilakukan analisis stabilitas lereng untuk mengetahui nilai *safety factor* lereng hilir Bendungan Lalung. *Safety factor* didefinisikan sebagai rasio geser rata-rata dikembangkan sepanjang permukaan kegagalan potensial (Das dan Sobhan, 2014). Hasil analisis kombinasi desain pada kedalaman *horizontal drains* +142,00 dan +140,50 ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

4.2.1 Hasil analisis kombinasi desain pada kedalaman *horizontal drains* +142.00

Kombinasi desain *horizontal drains* berada pada kedalaman elevasi +142.00 dengan kemiringan timbunan lereng hilir bendungan 1:3 dan dengan kemiringan galian timbunan *existing* 1:2 terdapat 4 variasi kombinasi desain, yaitu: tanpa *horizontal drains*, dengan panjang *horizontal drains* 8 meter, 13 meter, dan 18 meter. Hasil analisis kombinasi desain tanpa *horizontal drains* dan dengan *horizontal drains* panjang 13 meter dengan kedalaman +142.00 dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 9. Hasil analisis tanpa *horizontal drains* pada kedalaman +142.00.



Gambar 10. Hasil analisis dengan *horizontal drains* 13 meter pada kedalaman +142.00.

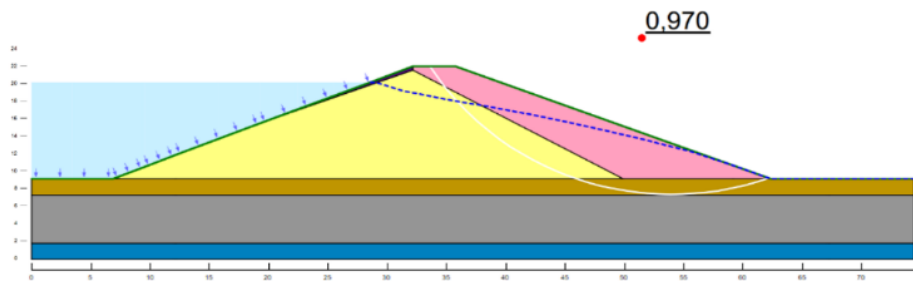
Mengacu pada Tabel 4 ditunjukkan bahwa hasil analisis Slope/W kombinasi desain pada elevasi air maksimum (+153.00) tanpa *horizontal drains* mendapatkan hasil *safety factor* 1.004, nilai tersebut tidak memenuhi syarat minimum SNI 8064:2016. Sedangkan dengan *horizontal drains* kedalaman +142.00 pada panjang *horizontal drains* 8 meter mendapatkan hasil *safety factor* sebesar 1,359, pada panjang 13 meter mendapatkan hasil *safety factor* sebesar 1,373, dan pada panjang 18 meter mendapatkan hasil *safety factor* sebesar 1,355. Panjang *horizontal drains* 8 meter, 13 meter, 18 meter tersebut memenuhi syarat minimum yang dipersyaratkan SNI 8064:2016 untuk analisis stabilitas lereng bendungan tipe urugan. Menurut Bowles (1991) nilai faktor keamanan Bendungan Lalung setelah direhabilitasi termasuk kategori lereng relatif stabil karena memiliki nilai *safety factor* >1,25.

Tabel 4. Hasil analisis kombinasi desain pada kedalaman *horizontal drains* +142.00.

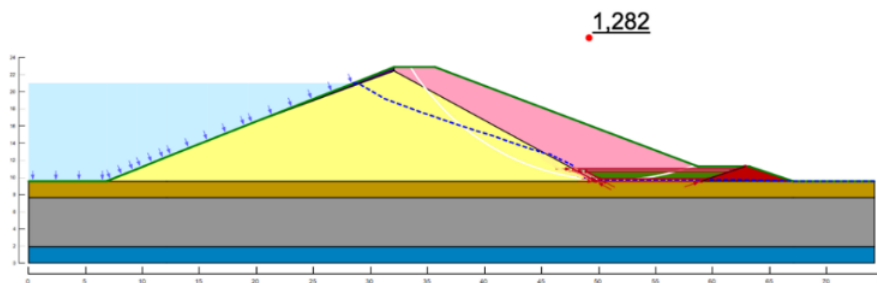
No	Kombinasi Desain	Safety Factor		
		Syarat	Hasil	Kesimpulan
1	Tanpa Horizontal drains	1.20	1.004	Tidak Aman
2	Horizontal drains 8 m	1.20	1.359	Aman
3	Horizontal drains 13 m	1.20	1.373	Aman
4	Horizontal drains 18 m	1.20	1.355	Aman

4.2.2 Hasil analisis kombinasi desain pada kedalaman *horizontal drains* +140.50

Kombinasi desain *horizontal drains* berada pada kedalaman elevasi +140.50 dengan kemiringan timbunan lereng hilir bendungan 1:3 dan dengan kemiringan galian timbunan *existing* 1:2 terdapat 4 variasi kombinasi desain, yaitu: tanpa *horizontal drains*, dengan panjang *horizontal drains* 8 meter, 13 meter, dan 18 meter. Hasil analisis kombinasi desain tanpa *horizontal drains* dan dengan *horizontal drains* panjang 13 meter dengan kedalaman +142.00 dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Hasil analisis tanpa *horizontal drains* pada kedalaman +140.50



Gambar 12. Hasil analisis dengan *horizontal drains* 13 meter pada kedalaman +140.50

Mengacu pada Tabel 5 terlihat bahwa hasil analisis Slope/W kombinasi desain pada pada elevasi air maksimum (+153.00) tanpa *horizontal drains* mendapatkan hasil *safety factor* 0,970, nilai tersebut tidak memenuhi syarat minimum SNI 8064:2016. Sedangkan dengan kedalaman *horizontal drains* +142.00 pada panjang *horizontal drains* 8 meter mendapatkan hasil *safety factor* 1.279, pada panjang *horizontal drains* 13 meter mendapatkan hasil *safety factor* 1.282, pada panjang *horizontal drains* 18 meter mendapatkan hasil *safety factor* 1.272. Panjang *horizontal drains* 8 meter, 13 meter, 18 meter tersebut memenuhi syarat minimum yang dipersyaratkan SNI 8064:2016 untuk analisis stabilitas lereng bendungan tipe urugan. Menurut Bowles (1991) nilai faktor keamanan bendungan lalung setelah direhabilitasi termasuk kategori lereng relatif stabil karena memiliki nilai *safety factor* >1,25.

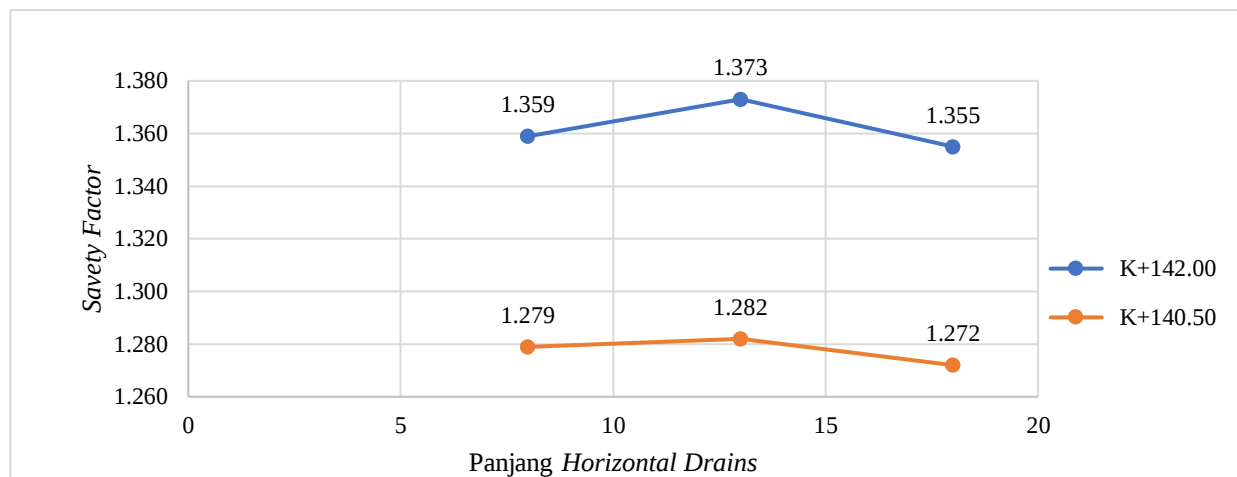
Tabel 5. Hasil analisis kombinasi desain pada kedalaman *horizontal drains* +140.50.

No	Kombinasi Desain	Safety Factor		
		Syarat	Hasil	Kesimpulan
1	Tanpa Horizontal drains	1.20	0.970	Tidak Aman
2	Horizontal drains 8 m	1.20	1.279	Aman
3	Horizontal drains 13 m	1.20	1.282	Aman
4	Horizontal drains 18 m	1.20	1.272	Aman

4.2.3 Hasil analisis

Komposisi tanah dengan kadar lempung yang tinggi pada Bendungan Lalung menyebabkan air rembesan sulit meloloskan diri dari celah-celah tanah. Penggunaan *horizontal drains* pada Bendungan Lalung mampu mengalirkan air rembesan yang masuk ke dalam tubuh bendungan secara horizontal menuju ke luar tubuh bendungan, dan membuat garis ekuipotensial cenderung mendatar. Garis ekuipotensial yang cenderung mendatar berakibat pada tanah timbunan bendungan menjadi lebih stabil. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Zomorodian, et al., (2010) bahwa *horizontal drains* memiliki pengaruh yang besar terhadap *safety factor*, penggunaannya diklaim mampu membuat garis ekuipotensial cenderung mendatar sehingga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas lereng bendungan. Akan tetapi, penempatan yang kurang tepat dapat memengaruhi efektivitas *horizontal drains* dalam meningkatkan stabilitas lereng hilir bendungan.

Keefektifan sistem *horizontal drains* ditentukan oleh beberapa faktor seperti: tipe saluran, lokasi, jumlah, panjang dan jarak (Raharjo, et al., 2011; Prellwitz, 1978) dan pentingnya sifat-sifat tanah dan geometri lereng sebagai parameter pengendali tidak dapat diabaikan. Mengacu pada Gambar 13, ditunjukkan bahwa lokasi penempatan *horizontal drains* pada kedalaman +142.00 memperoleh nilai *safety factor* lebih tinggi daripada penempatan *horizontal drains* pada kedalaman +140.50. Pada kedalaman *horizontal drains* +142.00 dan +140.50 diperoleh nilai *safety factor* paling tinggi adalah pada panjang 13 meter dan paling rendah adalah pada panjang 8 meter. Pada Penggunaan panjang yang berbeda pada *horizontal drains* mempengaruhi hasil nilai *safety factor* tapi tidak terlalu signifikan. Sedangkan penempatan lokasi kedalaman *horizontal drains* lebih mempengaruhi hasil nilai *safety factor*.



Gambar 13. Grafik hasil analisis kombinasi desain kedalaman *horizontal drains* +142.00 dan +140.50.

5 Kesimpulan

Hasil analisis tanpa menggunakan *horizontal drains* tidak memenuhi syarat minimum yang SNI 8064:2016. Sedangkan menggunakan *horizontal drains* dengan 6 (enam) kombinasi desain penempatan lokasi dan panjang lereng hilir Bendungan Lalung pada kondisi muka air maksimum (+153.00), semuanya memenuhi syarat minimum SNI 8064:2016. Dari analisa yang dilakukan, dapat diketahui penempatan dan panjang *horizontal drains* paling efektif pada lereng hilir Bendungan Lalung setelah direhabilitasi berada pada kedalaman *horizontal drains* +142.00 dengan panjang *horizontal drains* 13 meter. Penggunaan panjang yang berbeda pada *horizontal drains* mempengaruhi hasil nilai *safety factor* tapi tidak terlalu signifikan. Sedangkan penempatan kedalaman *horizontal drains* lebih mempengaruhi hasil nilai *safety factor*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L.W., Lee, T. S., Sharma, S., Boyce, G. M., 2002. *Slope Stability and Stabilization Method*. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons.
- Boushehrian, A., Rezaee, A., Vafamand A., 2017. *Studying the Effect of Horizontal Drains on Stability of Heterogeneous and Homogeneous Earth Dams during Rapid Drawdown Condition*. *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, 7(1), 31-45, Winter 2017.
- Choudhary, R. K., Jain, A., Sinha, A. S. P., 2018. *Rehabilitation Measures to Un-Breached Portion of Gararda Earth Embankment Dam, Bundi (Rajasthan)*. International Dam Safety Conference 2018.
- Das, B. M. dan Ramana, G., 2011. *Principles of Soil Dynamics Second Edition*. United States of America: Cengage Learning.
- Das, B. M. dan Sobhan, K., 2014. *Principles of Geotechnical Engineering*. Stanford: Cengage Learning.
- DRIP (Dam Rehabilitation & Improvement Project). 2018. *Manual for Rehabilitation of Large Dams*. Central Water Commission Ministry of Water Resource, River Development & Ganga Rejuvenation Government of India.
- FEMA. 2011. *Filter for Embankment Dams. Best Practices for Design and Construction*. Federal Highway Administration, US Department of Transportation. Washington DC.
- Geostudio, 2018. *Seepage Modelling with Seep/W*. Canada: Geo-Slope International Ltd.
- Geostudio, 2018. *Slope Modelling with Slope/W*. Canada: Geo-Slope International Ltd.
- Giroud, J. P., Gourc, J. P., Bally, P., Delmas, P., 1977. *Comportment d'un Textile Non Tisse Dams Un Barrage Enterre. Proceeding of the First International Geosynthetics Society*. Paris, 213-218.
- Gobla, et al. 2008. *Geotextile in Embankment Dams Status Report on the Use of Geotextile in Embankment Dam Contruction and Rehabilitation*. Federal Emergency Management Agency.
- Google Earth. 2022. www.google.com/earth [Online]. Diakses pada 31 Maret 2022.
- Hadimuljono, M. B., dan Kurniawan, P., 2021. *Rehabilitasi Bendungan dan Reservoir Konsep Serta Implementasi*. Yogyakarta: Penerbit ANDI.
- Hardiyatmo, H. C., 2006. *Tanah Longsor dan Erosi Kejadian dan Penanganan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C., 2017. *Mekanika Tanah 1*. 7th ed. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., 1981. *An Introducation to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- JLS, 1996. *Landslide in Japan. S.1.*, The Japan National Conference of Landslide Control
- Kutzner, C., 1997. *Earth and Rockfill Dam, Principles of Design and Contruction*. Darmstadt University of Technology Hofheim, Germany
- Lau, K.C., Kenney, T.C., 1984. *Horizontal drains to stabilize clay slopes*. *Canadian Geotechnical Journal* 21 (2), 241–249.
- Minmahddun, Anafi, 2018. *Analisis Stabilitas dan Deformasi Bendungan Jatigede Akibat Fluktuasi Muka Air Waduk*. Yogyakarta: Departement Teknik Sipil UGM Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.



- Prellwitz, R. W., 1978. *Analysis of Parallel Drains for Highway Cut Slope Stabilization*. Proceeding of the 16th Annual Engineering Geology and Soil Engineering Symposium, 153-180.
- Rahardjo, H., Santoso, V. A., Leong, E. C., Ng, S. Y., Hua, C. J., 2011. *Performance of Horizontal Drains in Residual Soil Slope*. Japanese Geotechnical Society: Soil and Foundations Vol, 51, No. 3 437-447.
- Sasrodarsono, S. dan Takeda, K., 2016. Bendungan Tipe Urugan. Jakarta: Balai Pustaka.
- SNI 8064:2016, 2016. Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan. Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 8065:2016, 2016. Metode Analisis Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan. Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 8460:2017, 2017. Persyaratan Perancangan Geoteknik. Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- Soedibyo, 2003. Teknik Bendungan. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Souliyavong, T., Gallage, C., Egodawatta, P., Maher, B., 2012). *Factors Affecting the Stability Analysis of Earth Dam Slopes Subjected to Reservoir Drawdown*. In: Second International Conference Geotechnique, Construction materials and Environment.
- Taylor, D. W., 1948. *Fundamental of Soil Mechanics*. John & Son. New York
- Tong, K. T., Zhao, C. Z., Ren, N. T., 1987. *Recent Applications of Geotextile Filter In China*. Water Power & Dam Construction. V. 39, no. 3, pp. 35-39.
- Wibowo, A.K., 2015. Perancangan Konstruksi Pengaman Longsor dengan Metode Kontrol dan Perkuatan. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil UGM.
- Zomorodian, S. and M. Abodollahzadeh, 2010. *Effect of Horizontal Drain on Upstream Slope Stability During Rapid Drawdown Condition*. International Jurnal of Geologi. 4: 4.